



TITLE:

震災リスクの軽減を目的とした大
都市域における水循環システムの
再構成に関する研究(
Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

清水, 康生

CITATION:

清水, 康生. 震災リスクの軽減を目的とした大都市域における水循環シ
ステムの再構成に関する研究. 京都大学, 2002, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2002-07-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r11008>

RIGHT:

震災リスクの軽減を目的とした
大都市域における水循環システムの再構成に関する研究

平成14年3月

清水 康 生

震災リスクの軽減を目的とした
大都市域における水循環システムの再構成に関する研究

平成14年3月

清水 康 生

目次

第1章 序論

1-1 大都市域における防災・減災の課題と水循環の意義	1
1-1-1 大都市域における防災と減災	1
1-1-2 阪神・淡路大震災における被害と課題	1
1-1-3 大都市域の水循環をシステムとして捉えることの意義	3
1-2 水循環に係わるリスクに関する考察	4
1-2-1 リスクとリスクマネジメント	4
1-2-2 大都市域水循環システムに関わるリスク	5
1-3 研究対象とする大都市域と水循環再構成の枠組み	6
1-3-1 淀川大都市域の水循環	6
1-3-2 活断層を対象とする理由と近畿地方の活断層の状況	11
1-3-3 本論文の枠組み	12
1-4 本論文の目的と構成	14
1-4-1 本研究の目的	14
1-4-2 本論文の構成	14

第2章 大都市域水循環システムモデルの構成

2-1 緒言	20
2-2 水循環システムの現状	21
2-2-1 淀川流域における水循環の現状	21
2-2-2 都市生活者からみた水循環システムの問題点	23
2-2-3 水循環システムのモデル化	24
2-3 水循環システムの再構成	27
2-3-1 震災ハザードと水管理者の課題	27
2-3-2 再構成のコンセプト	28
2-3-3 モデルの再構成	29
2-3-4 震災時を想定した水供給シナリオ	31
2-3-5 水循環システムの統合	32
2-4 結言	34

第3章 大都市域における水利用実態に関する分析

3-1 緒言	36
3-2 水源からの取水状況	36
3-2-1 水源構成	36
3-2-2 淀川に係わる取排水	37
3-3 都市活動レイヤーにおける水利用実態	39
3-3-1 用水の分類	39
3-3-2 家庭用水	40
3-3-3 都市活動用水	42
3-4 震災時の都市活動影響ポテンシャルに関する考察	42
3-4-1 水利用実態からみた地域の都市活動影響ポテンシャル	42
3-4-2 震災被害に関わる都市環境要因	47
3-5 結言	50

第4章 震災が水循環ネットワークへ及ぼす影響に関する分析

4-1 緒言	53
4-2 水循環システムに影響を及ぼす活断層系の抽出	53
4-2-1 活断層による地震動の推定方法と対象地域に関する活断層系の抽出	53
4-2-2 震度推定と水循環システムへ影響を及ぼす活断層系の選定	55
4-3 水循環ネットワークへの影響	56
4-3-1 震災ハザードと水循環ネットワーク	56
4-3-2 水循環ネットワークへの影響に関する考察	60
4-4 河川と都市活動への影響	61
4-4-1 河川への影響	61
4-4-2 都市活動への影響	61
4-5 結言	62

第5章 震災による水源汚染に関する分析

5-1 緒言	65
5-2 水環境汚染の実態とその特徴	65
5-2-1 淀川における過去の水質事故と震災による水環境汚染	65
5-2-2 水環境汚染の特徴	67
5-3 震災リスクのマネジメントのための調査プロセス	69
5-3-1 調査の意義と調査プロセス	69
5-3-2 淀川大都市域を対象とした汚染評価指標	71
5-4 対象地域における分析	74
5-4-1 有害物質を扱う施設の分布からみた地域診断	74
5-4-2 水道取水への影響	78
5-4-3 都市活動への連鎖的な影響	80
5-5 結言	82

第6章 震災リスク軽減のための広域水道システムに関する研究

6-1 緒言	84
6-2 震災想定時の時空間特性を考慮した連絡管ネットワークの構成	84
6-2-1 連絡管のネットワーク構成に際しての前提	85
6-2-2 連絡管の設置場所	87
6-3 水道事業体による最適連絡管ネットワーク	88
6-3-1 全体提携の論理	88
6-3-2 全体提携モデルの定式化	88
6-4 個別水道事業体の立場からの提携の可能性	93
6-4-1 個別水道事業体の論理	93
6-4-2 水量のみを考慮した提携モデル	95
6-4-3 費用負担を考慮した提携モデル	95
6-5 対象地域における事例分析	96
6-5-1 全体提携を前提とした事業体の費用負担	96
6-5-2 事業体の立場を優先させた提携の可能性に関する分析	98
6-5-3 事業体の提携に関する総合的な考察	103
6-6 結言	104
補遺 阪神・淡路大震災における被災地の水利用実態と復旧のシナリオ	106

第7章 震災リスク軽減のための下水道システムに関する研究

7-1 緒言	117
7-2 下水処理水を利用した水辺創成	117
7-2-1 平常時のアメニティ向上と震災時の水確保	117
7-2-2 震災時の水確保策としての下水処理水の位置付け	118
7-3 ネットワーク構造安定性の評価手法	120
7-3-1 大都市域水循環システムの評価の視点	120
7-3-2 ネットワーク構造のモデル化	120
7-3-3 ネットワーク構造安定性の評価指標	122
7-4 水辺創成モデルの定式化	125
7-4-1 大都市域水循環システムの定式化	127
7-4-2 水循環システムの連続式	131
7-4-3 目的関数と制約条件	133
7-5 淀川右岸地域における事例分析	133
7-5-1 水辺創成水路による代替案の作成	133
7-5-2 ネットワーク構造安定性の評価	140
7-6 結言	141

第8章 総合的な大都市域水循環システムの再構成に関する研究

8-1 緒言	144
8-2 大都市域水循環システムの統合モデル	144
8-2-1 統合の概念	144
8-2-2 統合プロセス	148
8-2-3 統合モデルの定式化	151
8-3 対象地域における事例分析	152
8-3-1 統合モデルによる水循環システムの再構成	152
8-3-2 ネットワーク構造安定性の評価	157
8-4 水管理に関する制度面からの考察	158
8-5 結言	160

第9章 結論

9-1 結果の要約	163
9-2 今後の課題	168

第1章 序論

1-1 大都市域における防災・減災の課題と水循環の意義

1-1-1 大都市域における防災と減災

大都市域とは中核となる大都市を中心に複数の都市が相互に何らかの関連を有し一体として認識できる地域と考える。ここで何らかの関連とは、地理的・社会的・経済的・文化的関連とする。したがって、大都市域では災害に対する備えも相互に関連を有した対策を講じる必要がある。この対策の目的は、被害を発生させないことを目指す防災（disaster prevention）と災害が発生してしまった場合にその被害をできるだけ軽減することを目指す減災（disaster mitigation）がある。

1-1-2 阪神・淡路大震災における被害と課題

阪神・淡路大震災では神戸市を中心に広範囲の市町村で被害を受けた。まず、主な被災都市における被災時の水循環に関する施設整備水準の概要を述べよう。水道に関しては、神戸市・西宮市・尼崎市・芦屋市のいずれの都市もほぼ 100%の普及率であり全国平均 95.3%よりも高い¹⁾（1994）。また、下水道処理人口の普及率は、神戸市 97.4%、西宮市 82.6%、尼崎市 97.7%、芦屋市 99.5%とやはり全国平均 49%よりも高い²⁾（1994）。阪神地域を流れる河川は、流域面積が小さく、流路が短く急勾配で水量の少ない河川が多く、親水公園としての整備・利用が行われている河川が多い³⁾。以上のことより、被災時の阪神地域における水循環システムは、維持管理の時代にあったといえる。特に水道と下水道の普及率はいずれの都市でも高く、事業管理者は施設を維持管理することに重点を置いていたと推察できる。

次にこれら都市の水循環に係る施設が震災（earthquake disaster）により受けた被害の概要を述べる。水道に関しては、従来の地震による被害が給水末端の管路が中心であったのに対して阪神・淡路大震災では末端だけでなく配水池・送水管・浄水場・導水管さらに取水施設までの水供給システムの全般にわたって被害を受けた点が特徴である。神戸市・尼崎市・芦屋市では、地震発生直後に各戸の断水率は 100%であり、西宮市は被害が南部に集中したため 95.8%であった。その後、復旧作業が進められ4市の断水率は直後に 99.3%であったが、1ヶ月後(2/14)26.0%、2ヶ月後(3/14)1.0%、そして震災から3ヶ月後の4月17日に完全復旧した⁴⁾。下水道については、管渠（汚水・雨水）の被害をみると神戸市で全埋設延長の 1.9%の延長で被災した。同様に西宮市 3.5%、芦屋市 13.3%、尼崎市 4.5%である。これら都市全体では 3.0%の延長で被災し復旧工事を行っている。処理場は4市内にある13処理場が全て被災した。特に神戸市で最も処理能力の高い東灘下水処理場では機能低下が5月7日まで続いた⁴⁾。神戸市内の河川は、掘り込んで河積を確保しているものが多い。護岸の局所的な被災は各所にみられたが、大きな延長にわたって崩

壊している例はみられなかった。しかし、淀川の本川左岸河口から 0.2～1.8km で液状化により堤防の堤体が沈下した⁵⁾。台風・梅雨期であれば治水上の問題が緊急課題となった被害である。

以上に述べたように被害は甚大でありその理由は、マグニチュード 7.2 という大規模な都市直下型地震であったことである。しかし、地震規模だけでなく人為的な側面にも問題はあったと思われる。震度 7 の区域は、神戸市の須磨区から東灘区・芦屋市・西宮市・宝塚市に至る人口密集地で発生している。この阪神地域は水資源賦存量の非常に少ない地域であり⁶⁾、神戸市では、水源の 4 分の 3 を淀川に依存している。前述のように震災時には水供給が止まったため多くの消火栓が使用できず十分な消火活動ができなかった。その後の避難生活でも生活用水の不足、瓦礫除去のための防塵用水の不足も生じた。このように、維持管理の不備が被害を拡大したとすることができる。

一方、水道法では、水道用水の緊急応援（第 40 条）が明文化されている。都道府県知事は都道府県の枠組みを越えて災害その他非常の場合において緊急に水道用水を補給することが公共の利益を保護するために必要であると認められた場合には水道事業者への水供給を命ずることが可能である⁷⁾。しかし、このような条文が存在するものの阪神・淡路大震災では同法の適用がなされなかった。同地震があまりに想定外の勃発であり、被害が甚大であったため法的手続きが行える状況ではなかったというのが実際であったと思われる。法的手続きを行おうとしても被害状況の把握や情報伝達が困難であり、その意思決定さえも不可能であったと推察される。震災による被災区域が広域であったため応援を要請する事業体自身が被災していたこと、また物理的に被災地まで水を輸送する有効な手段を持ち得なかったことも理由であろう。現場では、このような法的な手続きは取られていないものの、神戸市と隣接している三田市と三木市が震災後に設置した連絡管を通じて神戸市に対して緊急的な水供給を行っている。緊急応援を命ずることができるという制度は存在していたが、当事者は、同法の適用を想定した計画立案や施設整備の両面について準備が十分でなく対応が困難であったと考えられる。

阪神・淡路大震災では、被災が広範囲に及ぶ場合を想定していなかったことが都市生活者への被害を軽減できなかった理由の 1 つである。しかし、この問題は従来の水に関する水道、下水道、河川という個別管理の整備率をいくら高めてもそれだけでは十分に対応できない複数の管理主体に係わる問題である。それゆえに、前述のような災害による被害を防止・軽減する有効な対策を講じる計画作成や事業執行が難しいという構造的な問題が存在している。震災は広範囲の地域に甚大な被害を生じさせる。対策を講じるには水道事業者間だけでなく下水道事業者や河川管理者が従来の個別管理の枠組みを越えて計画立案や事業を進める必要があるだろう。今後、大都市域では地形条件・自然条件を踏まえた災害時の対応を考える必要があるが、事業者の管理区域を越えた大規模な災害が発生した時にどのように対応すべきかについて防災・減災計画の中で位置付けておく必要がある。

この点については、震災後、大都市域の水循環に係る水道・下水道・河川の各分野

から地震対策が示された。まず、水道事業については、水道の耐震化計画策定指針（案）（1997）⁸⁾と水道施設耐震工法指針（1997）⁹⁾が示された。同指針では、配水幹線の耐震化の推進が謳われており、従来の配水ブロック化計画において強調されていなかった主要施設の耐震化が指摘されている。下水道事業では、下水道施設の耐震性の向上を目指した下水道施設の耐震対策指針（1997）¹⁰⁾と地震後対策を主とした下水道の地震対策マニュアル（1997）¹¹⁾が改訂された。また、河川分野でも堤防の耐震化を図ることが示された¹²⁾。

これら対策の内容は、震災を想定した事前または事後の防災・減災計画に大別できる。施設の耐震化は防災計画として位置付けられ、震災時に被災した施設の機能を他の施設が補完するという事業者間の協力や施設のネットワーク化は減災計画と考えることができる。しかし、それらはあくまで水道・下水道・河川という分野毎の事業者相互の枠組み内での対策であり、大都市域の水循環を構成する河川・水道・下水道を1つのシステムとして捉えた対策とはなっていない。この点が問題であると考ええる。

1-1-3 大都市域の水循環をシステムとして捉えることの意義

阪神・淡路大震災の経験をふまえ、萩原¹³⁾は環境と防災が双対（duality）の関係にあることを指摘している。また、災害対策の戦略的課題については亀田¹⁴⁾が指摘している。これらの事項を本研究のテーマである水循環を例として説明する。

まず、萩原の指摘する「環境と防災の関係」において、環境の認識は重要である。すなわち、環境とはソシオ（社会システム）の中の人間活動（生産・流通・消費・廃棄）とエコ（生態系システム）、ジオ（自然活動）との関わりによって定義されている。同時に災害の危険事象や危険事情もこれらのせめぎあいの結果として引き起こされると考えている。平常時の環境を意識した人間活動が、即ち震災時の防災や減災につながるものであることを意味していると解釈する。一方、亀田は、防災情報システムの重要性を防災システムと日常システムの連続性という観点から論じている。

本研究では、萩原の指摘する観点から、平常時の環境と震災時の防災・減災を捉えよう。震災時に対策が迅速に機能するためには、平常時の人間活動が自ずと震災時の防災や減災につながる仕組みが重要である。日常の水利用においても同様な指摘が可能であると考ええる。

次に、震災時を想定した時にどの程度の被害がどの範囲で予想されるかという震災被害の分布を推定することが必要であることを亀田が指摘している。この結果に基づき都市の水循環機能に関する重要度評価を行いその機能の維持のために適宜、耐震化等の個別対策を行うことが必要である。国や地方公共団体の財政規模が限られていることを考えれば、今後はこのような重点整備の進め方が必要となるためである。

また、対策を講じるに当たっては、都市の「環境と防災の関係」について長期的な視点からそのせめぎ合いの過程を考察し、都市生活者の生活環境を無視した過度な防災指向（例えば都市河川の三面張りに象徴される自然と人間の分断）とならないようバランスのとれ

た新たな防災の仕組みを提案することが必要である。萩原は、前述のようにソシオという枠組みの中での人間活動がエコとジオとのせめぎ合いの結果として災害の危険事象もしくは危険事情を引き起こすことを指摘している。このような視点からの防災・減災計画の立案が重要であると考ええる。

最後に、以上の事項を踏まえて対策を講じる際には、社会全体としての防災・減災の考え方に対して方向性がそごを来さぬよう常に社会的合意が重要である。

一方、阪神・淡路大震災の被害の特色として能島・亀田¹⁵⁾は、電気・ガス・上水道・下水道・電話・道路・鉄道などの社会基盤施設での被害が相互に波及し相互作用の結果として被害が拡大し、災害復旧にも影響を及ぼした点を指摘している。水循環に関係する施設について言えば、停電により浄水機能や下水処理機能、ポンプ機能などが影響を受けるであろう。さらに、河川・水道・下水道に関連する施設だけに限っても水循環に関わる被害が相互に影響することは想定することができる¹⁶⁾。例えば、下水処理場の被災により汚水が水道水源である河川に流出した場合には、下流の水道取水に深刻な影響を及ぼすであろう。このような複合的・連鎖的な災害に対しては、事業者が個別の整備水準を高めたとしても、相互の関係を意識して有機的に結びついて機能することがないため限界が存在する。

河川・水道・下水道は、大都市域における水循環の重要な構成要素である。萩原、亀田の指摘を踏まえ、これらを都市生活者の営みである都市活動との関わりの中で一体として認識した大都市域水循環システムとしてのコンセプトが求められている。

1-2 水循環に係わるリスクに関する考察

1-2-1 リスクとリスクマネジメント

本論文におけるリスクおよびリスクマネジメントの概念について述べる。危険が生じると、対応の仕方次第で何らかの被害(loss)が生じるが、その被害の生じる確率を狭義のリスク(risk)と定義する。リスクが確率概念としてとらえられている点に留意する必要がある。また、一定の確率分布として示すことができない場合には不確実性(uncertainty)として定義する¹⁷⁾¹⁸⁾。これらは、いずれも人間の生命や経済活動にとって望ましくない事象の発生の不確実さの程度を表す概念である。また、望ましくない事象が発生した時、その結果の大きさ(重大さ)は対策内容や重要度の評価に関わる重要な観点である。本論文ではリスクを人間の生命や社会経済活動にとって望ましくない事象の発生の不確実さの程度およびその結果の大きさの程度として定義する。

リスクの存在を論じることは、被害が確実に生起する状態では意味がなく、あくまで被害の発生はまだ起こっていない状態で、その発生の可能性が検討の対象となることを意味している。一方、危険も危険事象(peril)と危険事情(hazard)とに区分される。前者は、例えば地震という自然現象それ自身を指す。その場合、後者は危険事象の発生する環境条件・要因全般を意味している。例えば、震源地周辺の地質状態、土地利用や人口集積度な

どである。ただし、両者の区別は絶対的ではあり得ず、後述する主体の概念とその規定の仕方に大きく依存する。地震の生起に伴って生じる被害の発生の防止もしくは軽減を図るためにとるべき各種の対応も広義にはすべて危険事情に含まれる。

岡田¹⁷⁾は、上述のリスクの要素をベースとしてリスクマネジメントに主体（agent）の概念を導入し、リスクマネジメントの概念をシステム論的に展開している。すなわち、危険事象に対する対応を行動（action）として位置付けるとともに、その行動の担い手となる主体を行動主体（action-taking agent）と称している。さらに、その被害を受ける対象を「被害客体」（loss-suffering agent）として行動主体と分けている。危険事象に対する危険事情や行動の結果として新たな危険事象や危険事情が生起し、また、その結果として生じる被害の程度も危険事象、危険事情ならびに行動に依存しているそのような連鎖的な被害拡大も考えられる。行動主体と被害客体は、分けて考えることによりリスクに関わる状態を明確に認識することができる。以上に述べたように被害（結果）は、危険事象、危険事情、行動の3種の要因に依存している。本論文におけるリスクマネジメントとは、危険が起こり得ることを前提にした上でこれらの要因の組み合わせで被害（結果）を防止・軽減させる行為であると定義する。

1-2-2 大都市域水循環システムに関わるリスク

本論文で対象とする震災リスク（earthquake disaster risk）を前述の内容を踏まえて改めて定義する。すなわち、震災リスクとは、地震（危険事象）によって発生する、人間の生命や社会経済活動にとって望ましくない被害（結果）の発生の不確実さの程度である不確実性とその被害（結果）の大きさの程度であると定義する。不確実性についてはシナリオを設定し、被害の大きさについては具体的な指標を設定して論じるが、これらについては本文にて説明する。

大都市域水循環システムに関係するリスクは震災リスク^{19)~25)}だけではない。都市生活者にとって環境汚染リスク、渇水リスク、浸水リスク、生態リスク及び健康リスクが考えられる。本研究において、都市生活者とは萩原²⁶⁾の定義を参照し、大都市域において自宅や職場などで多様な水利用を行い生活や都市活動を営む者と定義する。

環境汚染リスク²⁷⁾²⁸⁾とは、都市活動を営むことを目的に様々な有害物質を製造・利用・廃棄する過程で、何らかの理由により物質が水域に漏れ水道水源を汚染し取水を困難とさせるような事態を想定した場合に定義されるリスクである。ただし、震災時を想定した場合でも水域の環境汚染の発生は想定される。このような環境汚染については震災リスクとして取り扱い本論文で論じるものとする。

渇水リスク^{29)~33)}は少降雨が危険事象であるが、水資源開発の進捗（危険事情）や河川管理者の行う渇水時のダム管理の方法（行動）によって河川流量（結果）が決まる。この結果は水道事業者にとって危険事象であり、水道施設整備状況（危険事情）と給水制限の掛け方（行動）によって都市生活者の使用できる水量は制限され、さらに、都市生活者自

身の節水行動によっても使用する水量は違ってくる。このように、水源から水使用者まで多段的な危険事象・危険事情が存在していると考えることができる。

浸水リスク³⁴⁾³⁵⁾は、降雨量を時間単位程度の時間スケールで眺めた時、都市雨水の排除が困難となり浸水が生じ都市生活に影響を及ぼすことになる事態を想定した場合に定義される。危険事情である河川システムや下水道システムの整備、都市生活者の貯留の工夫や行動主体である河川、下水道管理者の行動によって被害の程度が違ってくる。

生態リスク^{36)~38)}は、生物の多様性に関する条約(1993)に示される生物の保全を前提とした時、初めて定義されるものであり、被害客体は都市生活者と共に生態系(生物)である点が特色である。都市アメニティという概念の中で水・土・緑の効用を位置付けて考えることができるが³⁹⁾、この「水」を大都市域で確保する水循環は重要な要素である。それらが揃った時の生態系の状態までを評価の対象とする点が特色である。

健康リスクは、水を利用する生活の中に存在する様々な危険物質が危険事象であり危険事情である。例えば、水源から取水し浄水を行った後に配水される水道管が鉛管である場合には、都市生活者に鉛溶出による影響を及ぼす。健康リスクは、このように日常的に長期にわたり都市生活者の健康へ影響を及ぼす点が特色である。

以上のリスクを定義するために想定する場面は、各々時間的・空間的スケールが異なる。敢えて各リスクの状態を説明する4つの要因を示せば表1-1のとおりである。

大都市域水循環システムは、これらリスクを総合的にマネジメントできるよう構成されねばならないが、本論文では、まず、第一歩として震災リスクを対象として論じるものとする。

1-3 研究対象とする大都市域と水循環再構成の枠組み

1-3-1 淀川大都市域の水循環

(1) 研究対象とする大都市域

琵琶湖・淀川水系は、面積8,240km²の広さを有し、水系を構成する主な流域は琵琶湖流域、宇治川流域、桂川流域、木津川流域、下流の淀川本川流域および猪名川流域である。本論文では、上水道取水施設や下水処理場放流施設の集中する、桂川の保津峡流量観測所、琵琶湖疏水、宇治川の日ヶ瀬ダム、木津川の加茂流量観測所から下流の区間を対象とし、同区間から取水された水が上水道として供給される区域およびそれらの水道水が都市で利用され、下水道を通じて下水処理場に集水され、処理された水が放流されるその河川を対象とする。琵琶湖流域は、水循環システムが水道や下水道といった人工系水循環システムでなく水文学的な水循環が中心と考えられるため、それらを同等に扱うには問題があると考え本研究の対象地域からは除いた。研究対象地域は、政令指定都市である京都市、大阪市、神戸市を中心とした淀川大都市域である。同地域で淀川の水を水源とする人口は約1,300万人(1993)⁴⁰⁾である。

表 1-1 大都市域水循環システムに関わるリスク

リスク	危険事象	危険事情	リスク（状態）を規定する要因			
			行動主体（行動）		被害客体（結果）	
			メジャー	マイナー	直接	間接
震災リスク	地震	水循環システムの整備レベル、水利用実態	河川管理者 水道管理者 下水道管理者	都市生活者 NPO ボランティア	都市生活者	
環境汚染リスク	有害物質の水域への漏出	有害物質取り扱い施設の立地	河川管理者 下水道管理者 都市活動主体（工場主等） 都市生活者	NPO ボランティア	都市生活者	生態系
渇水リスク	少降雨	水資源開発の遅れ、水需要の急増	河川管理者 水道管理者	都市生活者	都市生活者	生態系
浸水リスク	多降雨	河川・下水道の整備レベル、土地利用	河川管理者 下水道管理者		都市生活者	
生態リスク	生態系の攪乱行為	不可逆な開発、生物の希少性	河川管理者	都市生活者 NPO ボランティア	都市生活者 生態系（生物）	
健康リスク	危険物質の利用	危険物質の日常的曝露	水道管理者 下水道管理者 都市活動主体（工場主等）	河川管理者 NPO	都市生活者	生態系

注：NPO とボランティアは当該大都市域には必ずしも居住・通勤等していないという意味で都市生活者と分けて記述した。

(2) 淀川大都市域における水循環の個別管理へのコンテキスト

淀川流域における明治期以降の水循環の主な改変を表 1-2 に示す。同表に示されるように水循環を改変することとなった事業には何らかの契機が存在している。例えば、洪水の頻発、経済成長に伴う水資源開発、都市への人口集中や疫病の蔓延、環境の悪化（水質汚濁の進行）である。

明治初期の淀川は下流部で大川・中津川・神崎川の 3 川に分流し、頻繁に起こる洪水により大きな被害を受けていた。このため、1896 年の河川法の制定を受け中津川沿いに新川を開削し、大川と神崎川の淀川からの締め切り、大川との分派口への洗堰と閘門の設置、神崎川との分派口への樋門の設置、宇治川と巨椋池の分離を主な内容とする淀川改良工事が行われ 1910 年に竣工した。大川分派後の淀川本流を新淀川（現在の淀川）、大川を旧淀川と称している。また、新淀川の河床の深掘を防ぐと共に毛馬洗堰から大川（旧淀川）に放流する水量を増加させるため 1914 年に長柄起伏堰が設置された。淀川では、1953～1965 年にかけて計画高水流量に近い洪水に見舞われた。1971 年に改訂された「淀川水系工事実施基本計画」では計画高水流量を増大させ 200 年に 1 度の規模の洪水を対象とした治水計画を策定している。これに伴い、長柄可動堰も淀川大堰として新たに建設されることとなり、毛馬排水機場・毛馬水門・毛馬閘門と共に 1983 年に竣工した。この毛馬水門は大川への維持用水の分流と大阪市内の洪水防御を目的としている。この淀川大堰の運用により淀川本川の流況が調整されており、大堰による背水は枚方地点よりも上流にまで及んでいる。

一方、淀川の水資源開発は、第一次世界大戦後の産業発展により用水需要が増大したため、その必要性が高まった。また、新規水利と既得水利との競合が激しくなったため、立法上の解決を迫られるに至り、1942 年に淀川河水統制計画が策定された。事業は国の直轄で行われたが戦中戦後の物資不足などもあり 1951 年になって竣工した。琵琶湖の利用に関しては、河水統制事業の段階から種々の計画が議論されていたが、1972 年になり琵琶湖総合開発計画として実施されることとなった。琵琶湖総合開発事業は、保全・治水・利水という 3 つの方針で事業が進められた。利水では、大阪市・大阪府・阪神水道企業団などを利水者として下流の水道用水や工業用水の確保のために 40m³/s の水量が開発された。同事業は 1997 年に完了している。

上水道の導入は、産業発展に伴う都市への人口集中と疫病の蔓延に密接に関係している。明治初期まで、対象地域の生活用水の水源は、河川水や湧水、地下水を直接利用するものであった。しかし、1879 年と 1886 年にコレラが全国的に大流行し、飲料水の衛生確保が近代化の大きな課題となった。1890 年の水道条例により水道事業は市町村が経営することが制度として定められ、以後、各地で普及が図られることとなった。大阪市は、1895 年に最初に水道水の供給を開始したが、この上水道整備は、コレラの大流行と大火災（1890 年）が発生したことに端を発している。その後、神戸市が 1900 年に供給を開始し、琵琶湖第二疏水が完成したことにより京都市も 1912 年に供給をはじめた。このように明治の

表 1-2(1) 淀川流域における明治期以降の主な水循環の整備 (41)~(48)

時期	法制度等	流域における水循環の整備 (河川・水道・下水道)	記事説明	備考
明治				
1878(11)		神崎川付替竣工		
1887(20)	横浜市水道		我が国最初の近代水道としての給水を開始する。	我が国最初
1890(23)	水道条例		伝染病対策を目的として、市町村が水道を経営するものとした。	
1895(28)		琵琶湖第一疏水完成 大阪市で上水道給水開始	疏水による発電等により京都市の産業復興を図る。 明治 23 年の大火やコレラの流行などにより上水道への要求が高まった。同年に桜ノ宮取水場（浄水場）が竣工した。	我国 4 番目
1896(29)	旧河川法	大阪市で抽水所完成	我が国初のポンプ場として本田抽水所が完成する。	
1900(33)	旧下水道法		治水中心の近代河川制度の誕生。 土地の清潔を保つことを目的として制定される。	
1910(43)		神戸市で上水道給水開始	明治 23 年のコレラの大流行で水道布設の機運が高まった。布引貯水池等を水源として給水を開始する。	我国 7 番目
1912(45)		淀川改良工事竣工（新淀川）	度重なる洪水を契機として神崎川と大川を樋門、洗堰により締め切り、中津川沿いに新水路（新淀川）を開削した。	
1914(3)		琵琶湖第二疏水完成 京都市で上水道給水開始	生活用水として地下水を利用していたが、汚染問題が顕在化したため疏水を水源とした 献上浄水場（我が国初の急速濾過法）からの給水を開始する。	
大正				
1914(3)		長柄起伏堰竣工 活性汚泥法の開発	新淀川の深掘防止と大川への放流量増大のために建設された。 イギリスにて下水の処理方法として活性汚泥法が開発される。	
1919(8)	都市計画法公布		受益者負担金の徴収が可能となる。	
1925(14)		大阪市にて活性汚泥法の実験開始	市両抽水所にて活性汚泥法の処理実験始まる。	
昭和				
1934(9)		長柄可動堰竣工 京都市で下水処理場の供用開始	長柄橋梁工事に伴い起伏堰から可動堰に改築される。 吉祥院処理場が供用を開始する。	
1940(15)		大阪市で下水処理場の供用開始	津守・海老江処理場が供用を開始する。	
1941(16)		巨椋池干拓工事竣工	干拓により沿岸の浸水被害がなくなり新田の開発がなされたが、豊かな生態系は喪失した。	
1942(17)		淀川河水統制計画策定	産業発展による水需要の増大が既得水利と競合するに至ったため立法上の措置として計画が策定された。	
1951(26)		阪神上水道市町村組合 （阪神水道企業団） 淀川河水統制事業竣工 大阪府営水道が供給開始 神戸市で下水道事業着手	増加する阪神地域の水需要に対応するため淀川（柴島）からの取水による供給を開始。 構成市町村は神戸市・尼崎市・西宮市など 3 市 14 町村であった（その後 4 市に統合）。 人口増加による市町村の水道水源の不足が深刻化したため用水供給を開始した。 し尿処理対策と浸水対策を目的として事業着手される。	

表 1-2(2) 淀川流域における明治期以降の主な水循環の整備 ^{41)~48)}

時期	法制度等	流域における水循環の整備 (河川・水道・下水道)	記事説明	備考
1956(31)	工業用水法		工業の健全な発達と地盤沈下の防止を目的とする(工業用水道事業法は1958年に制定)	
1957(32)	水道法 水道行政の分割		公衆衛生の向上と生活環境の改善を目的とする水道法が成立。 上水道と下水道終末処理場は厚生省、下水道で終末処理場以外のものが建設省、工業用水道は通商産業省のそれぞれの専管となる(水道行政の3分割)。	
1958(33)	下水道法		都市の健全な発展と公衆衛生の向上を目的とする下水道法が成立。	
1964(39)	河川法	神戸市で下水処理場の供用開始	神戸市中部処理場が供用を開始する。	
		長柄可動堰の嵩上げ工事	治水・利水の体系的な制度として河川法が成立(水系一貫管理制度の導入、利水関係規定の整備)。	
		京都府営水道が供給開始	可動堰は水需要の増大と地下水汲み上げ規制による代替水源を確保するため嵩上げされた。	
1965(40)		天ヶ瀬ダム竣工	山城地域への供給が開始される。	
1967(42)	下水道法改正	大阪府流域下水道に着手	寝屋川流域下水道が我が国最初の流域下水道として事業着手された。	
1970(45)	下水道法改正		下水道終末処理場の建設が建設省の所管となる(いわゆる下水道行政の一元化)。 「公共用水域の水質保全」を下水道法の目的に加える。	公害国会
		寝屋川導水路竣工	下水道終末処理場の管理が建設省となり下水道行政が実質的に建設省に一元化された。 公共下水道管理者は、条例で定めるところにより下水道使用者から使用料を徴収することができる旨が明記される。	
1972(47)		琵琶湖総合開発計画策定	寝屋川の水質浄化のために浄化用水として淀川から導水路が建設される。	
1973(48)	河川の分割管理	大阪府流域下水道供用開始	利水・治水・保全を3つの柱として総合開発計画が策定される。	
1974(49)		毛馬水門竣工	寝屋川流域下水道の礫池下水処理場と川俣下水処理場が供用を開始する。	
1977(52)	水道法改正		都市域の流域面積200ha以上は河川、未滿は下水道として管理することを原則とする。 大川への維持用水の分流と大阪市内の洪水防衛を目的とする。	
1979(54)		京都府流域下水道供用開始	「広域的水道整備計画」が制度化される。	
1981(56)		毛馬排水機場竣工	桂川右岸流域下水道の洛西浄化センターが供用を開始する。	
1983(58)		淀川大堰竣工	寝屋川流域・大阪市内の洪水防衛のために建設。 昭和46年に策定された淀川工事実施基本計画による低水路幅の拡幅等のため建設された。	
平成				
1992(4)	水質基準改正		水道法に基づく水質基準項目の他に監視項目・快適水質項目が設定される。	
1994(6)	水源2法成立			平成6年列島渇水 阪神・淡路大震災
1995(7)				
1997(9)	河川法改正	琵琶湖総合開発完了	「河川環境の整備と保全」を河川法の目的に加える。 大阪市・大阪府・阪神水道企業団などに計40m ³ /sの水道用水・工業用水を開発。	

中期から後期にかけて、淀川大都市域の主要都市では上水道の供給が開始された。

下水道に関しては、衛生上の問題から下水溝の改良工事が行われてきた。しかし、し尿処理については明治期にはその技術が開発されておらず、活性汚泥法の開発は 1914 年である。さらに、大阪市が導入の実験を開始したのは 1925 年になってからである。し尿は戦後まで農地で肥料として利用され農業生産を高める役割を担っていた。都市により事情は若干異なるが、し尿処理の必要が緊急の課題となったのは、高度経済成長期が始まり都市に人口が集中するようになってからである。このような状況において、下水処理施設の導入は多くの都市で計画されたが、それを困難にしていた最も大きな理由は財源の確保が不可能であったことである。受益者負担金、使用料の徴収及び補助金に関する制度が整えられて初めて事業着手が進展したと言える。

このように個別の水循環システムの改変は、地域の社会経済の変遷と密接に関係している。これらを総合して、大都市域水循環システムという観点でみた場合にはどう変遷したであろうか。上水道や下水道ができる前の都市生活は、人工系の水循環がなくても生活を維持しており、自然系の水循環機能を利用して生活を営んでいた。例えば井戸水や河川水の直接利用である。人工系の水循環システムに都市生活が依存するようになった当初、水道、下水道は前述のように個別の整備論理を持っていた。その後、1957 年に、いわゆる「水道行政の 3 分割」が行われたため、個別目的の整備を効率化することができた。しかし、相互の影響を考慮した水循環システムとしての見方も分断されてしまった。この延長として、現在の高整備率を達成できたことは事実であるが、一方で大都市域の水循環システムが個別管理になってしまったと考えられる。

現状の大都市域における水循環の個別システム（河川・水道・下水道）は、人工的であり以前よりも制御可能性の高いシステムであると言える。しかし、水循環システム全体としての調整については強く意識されていないため、個別システムでは対応できないような広域に及ぶ強い外力に対して脆弱である。このことは、阪神・淡路大震災の被害が甚大であったことによって明らかにされたと言える。

現在、これら個別システムを全体システムとして機能するよう再構成し、統合していくことが求められていると考える。これは震災リスクに対するリスクマネジメントそのものであり、ここに大都市域水循環システムの再構成の意義があると考ええる。

1-3-2 活断層を対象とする理由と近畿地方の活断層の状況

地震は、プレート間地震を中心とする海洋型地震とプレート内で発生する内陸型地震がある。紀伊半島沖にマグニチュード 8 以上の巨大地震が 90～150 年の間隔で起こっているが、これは海洋型地震である。最近では 1946 年に南海地震が起きている。一般に危険事象として地震を考える以上、海洋型地震も対象にする必要があるが、本論文の対象地域に対して想定される海洋型地震は上述の南海地震である。同地震については亀田¹⁴⁾により 21 世紀中には地震が発生することを想定する必要があることが指摘されているが、本論文の

対象地域に対しての影響は過去の事例からも小さいと予想される。このため本論文では内陸型地震を対象とする。次に内陸型地震を起こす活断層について説明する。一般に最近の地質年代に繰り返し活動し、将来も活動することが推定される断層を活断層という。その判断の目安となるのは近い過去に活動をしたかどうかである。この過去の期間の取り方は研究者により相違があるが、本論文では断層データの揃っている活断層研究会⁴⁹⁾⁵⁰⁾の定義に従い地質年代の区切りである第四紀200万年前から現在までの間に動いたと見なされる断層を活断層として扱うものとする。このような定義で淀川流域を眺めると、近畿三角地域（敦賀湾から伊勢湾線を北東辺、敦賀から淡路島西岸に至る線を北西辺、中央構造線を底辺とする三角形の地域）と呼ばれる活断層の多数存在する範囲に対象地域が位置していることがわかる。淀川大都市域の水循環システムを論じるために、本研究では、地震を起こす対象として同地域に存在する活断層系を対象とする。

1-3-3 本論文の枠組み

本研究の危険事情は対象地域に存在する活断層系であり、危険事象はそれら活断層系による地震である。そして、被害客体は対象地域の都市生活者である。この都市生活者にとっての震災リスクを軽減するために、以下に述べる前提条件と時間的・空間的な条件を表す境界条件のもとで研究を行う。

震災時における水供給の確保は、電気・道路・通信など他の社会基盤施設の被災による影響を受けることは明らかである。しかし、本研究では、まず水道と下水道そして河川を対象とした大都市域水循環システムの再構成の重要性を強調するため、他のシステムの影響はシステム境界をなすと認識し、将来、シナリオを作成することにより考慮することとし、本研究では影響を考慮しないことを断っておく。

農業用水は、我が国全体では全水使用量の64%を占め主要な用途となっている⁵¹⁾。しかし、対象地域においては水利権ベースで22%と小さい割合となっている⁵²⁾。また、農業用水は年間を通じて代掻き期間から冬季までその利用水量の変化は大きく、利用実態を把握するデータも少ない。以上の理由から農業用水は対象としないものとする。

また、地下水は、地下水位や水質については定期的な観測データが存在しているが、対象地域のような広範囲での循環経路や賦存量の実態に関する知見は少ない。さらに、対象地域内での水道事業者の地下水利用量は約6%（1996）¹⁾と小さいため本論文ではマネジメントの対象とは考えず与件とする。

工業用水道については、その水源水量を減災のために活用することが考えられる。しかし、工業用水は特定の事業者を対象として送水されているため送水経路が限定され水質レベルも上水道と比較して低いいため飲料水を供給する上水道への転用を考えにくい。このため本研究では対象としないこととする。

震災リスクをどのような空間スケールで捉えるかによって、リスクマネジメントを構成する要因も異なってくる。本研究は、震災リスクを大都市域という空間スケールで捉える

ものとする。これは流域レベルのスケールである。従って対象地域内の政令都市とそれらを除いた府県を市区町村の単位で捉え、水供給の行動主体は、これら規模の水循環をマネジメントすることが可能な事業者である政令市の水道事業体と水道用水供給事業体とする。下水道に関しては、流域下水道と公共下水道を対象とする。河川は、これら水道・下水道と取排水を通じて関連のある河川を対象とする。

以上より、大都市域の水循環は、水道事業者の管理する水道システム、下水道事業者の管理する下水道システム、河川管理者の管理する河川システムの3つの要素から構成され则认为。各システムは、水循環を構成する輸送・貯留・水質変換の機能を有する施設から構成されている。流域レベルの空間スケールで考察を行うため、上記のいずれかの機能を有する、水道システムでは取水施設・浄水場・配水池・導水管・送水管等、下水道システムでは幹線管渠・下水処理場・放流施設、河川システムでは堤防・主な河川構造物を対象とする。

このような枠組みのため以下に述べる震災被害については取り扱わないこととする。まず、空間スケールに関しては、水道システムにおける配水管から各戸までの水道管における被災とそれに対する市町村内での対策、下水道システムの各戸から排出される下水の幹線管渠までの被災とその対策である。これらは、市町村レベルの問題であると考え対象としない。また、時間スケールは、流域内を水が循環する時間オーダーとして年間平均1日をベースとして捉えるものとする。このため、時間刻み（分刻み）の降水量が問題となる雨水問題は分析の対象とせず、雨水管や雨水貯留施設は取り扱わないこととする。本研究では、下水道システムにおいて污水管渠のみを対象とする。水環境汚染の問題についても、流域レベルで捉えることとし、汚染物質の流出メカニズムを時間軸上で取り扱うことはしないこととする。

稲場⁵³⁾は震災後のトイレ利用により被災した下水管渠から漏出した下水が水道水や井戸水を汚染する可能性を指摘している。被災後に断水が生じた時、一般家庭では井戸水を活発に利用するだけに重要な問題である。この点については、仮設トイレなど貯留施設を身近な場所に確保し、し尿の収集処理を提言している。本研究では、被災後に断水しトイレ用水が不足した場合に処理水の利用を提案している。ただし、空間スケールを流域レベルで見ているため、処理水は家屋が倒壊した場合には避難所（下水管渠が被災しておらず、かつ仮設トイレが設置されていると考える）で利用する水として、また水道だけが断水した場合には自宅で利用できる水と仮定して提案している。現実にはこのような状況だけであるならば地下水汚染を引き起こす事態には至らないであろう。しかし、流域レベルでなく市町村のレベルで被災状況を眺めたならば、指摘されたような事態の発生を見逃す訳にはいかない。汚染の場所を特定し、汚染の拡大を時間軸上で捉えていく必要がある。このように研究の枠組みである時間的・空間的スケールを流域レベルとしたことにより、多くの課題が残ることを断っておく。

1-4 本論文の目的と構成

1-4-1 本研究の目的

本論文では、震災リスクの軽減を目的とし、河川システム、水道システム、下水道システムが相互に水循環機能を補完することが可能な大都市域水循環システムの再構成の方法論に関して研究を行う。従来の個別的な事業管理の枠組みを越え都市生活者の視点からシステムの再構成について長期的な構想計画として論じるものとする。

1-4-2 本論文の構成

本研究は、システムズ・アナリシス³³⁾⁵⁴⁾の手順に従い論文を構成した。システムズ・アナリシスとは、問題の明確化→調査→分析→代替案の設計→評価→問題の明確化…という循環的な手続きをふみ、このような過程を通して問題を解決していく分析全体を総称したものである。本論文の構成を図 1-1 に示す。本研究は、計画作成における代替案の設計までを行っている位置付けられる。以下に内容を説明する。

第2章「大都市域水循環システムモデルの構成」では、本論文全体の論理的な構成について説明する。まず、対象地域における河川、水道、下水道を水循環システムの現状として説明すると共に、阪神・淡路大震災を経て明らかとなった問題点を指摘する。これらを踏まえ分析の枠組みとなる現状の大都市域水循環システムモデルを提示する。次にこのシステムを再構成するためのコンセプトを明確にする。なお、このコンセプトは、都市生活者の視点から震災対策が震災時だけに限定されず、平常時でも意味を持つよう提示される。本章は、問題の明確化を行い、大都市域水循環システムを再構成するための計画フレームを設定している。

第3章「大都市域における水利用実態に関する分析」では、淀川の水利用の実態を調査し、震災想定時の都市活動影響ポテンシャルについて分析する。まず、対象地域内の水道事業体の水源状況を調べ、淀川からの取水が水道水源としてどの程度重要であるのかを検証する。また、淀川を介した水道と下水道の水循環の実態を整理する。

次いで、震災時に断水が生じた時の影響について調べるため、家庭用水と都市活動用水の水利用実態を整理する。さらに、水面積や木造住宅率など水道システム以外の都市環境要因から震災時の都市活動影響ポテンシャルについて考察する。

第4章「震災が水循環ネットワークへ及ぼす影響に関する分析」では、対象地域の水循環ネットワークに影響を及ぼすと考えられる6つの活断層系を選定し、これらの震災ハザードに対して、水道・下水道ネットワーク（浄水場、下水処理場、水道管路、下水道管渠等）と河川が直接受ける可能性のある影響について分析する。主要都市は、いずれかの震災により大きな影響を受け、単独の事業体の管理区域を超えて複数の事業体が広域的に影響を受けることを示す。また、震災ハザードが第3章で分析した都市活動影響ポテンシャルの高い都市に及ぼす影響について考察する。

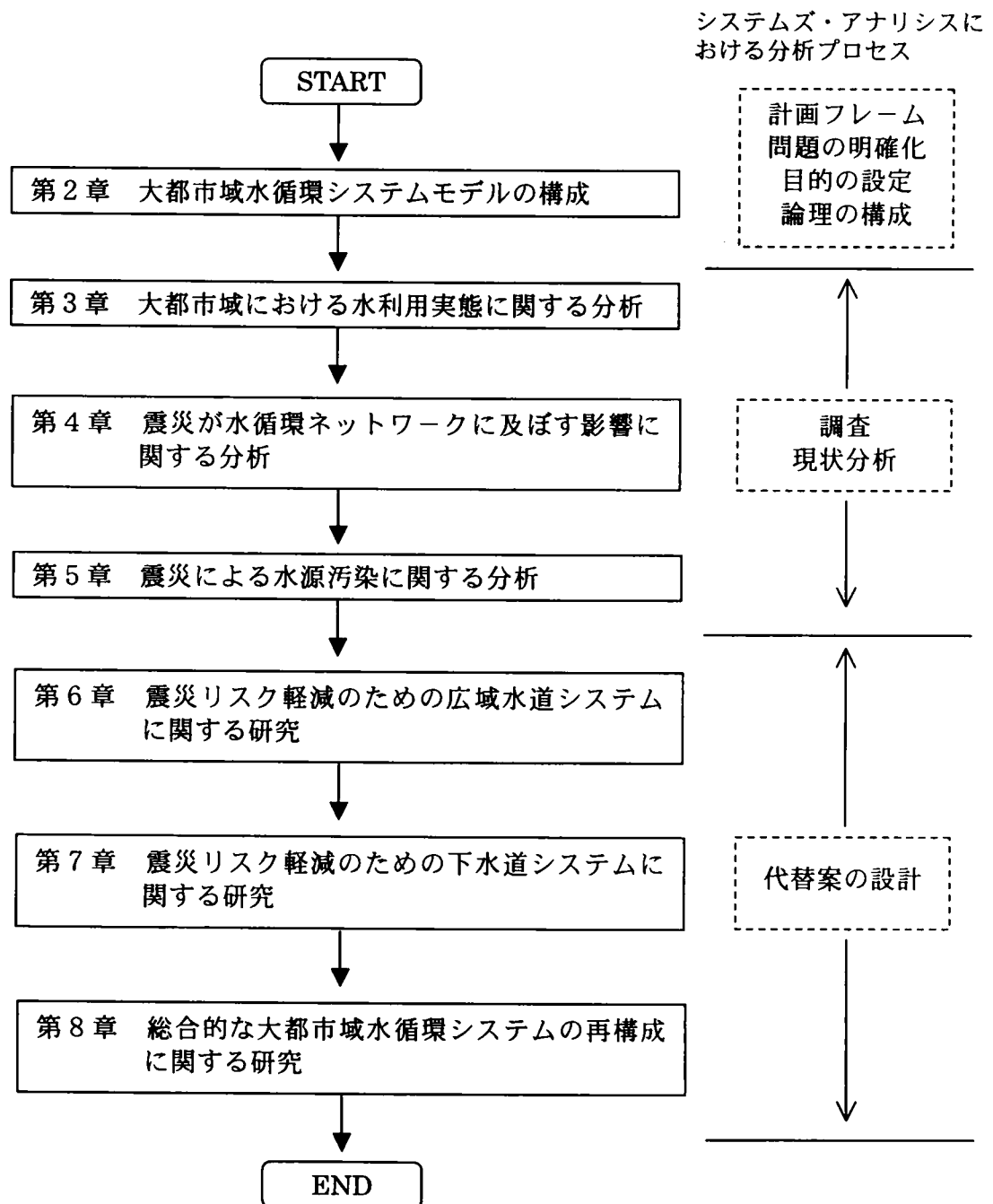


図 1-1 本論文の構成

第5章「震災による水源汚染に関する分析」では、水源が汚染された場合の水道取水への影響について分析を行う。下水処理場が被災して未処理汚水が河川に流出すると、この事態は下流部の利水に一定期間、深刻な影響を及ぼすことが予想される。このような水源汚染は下水道施設の被災だけに限らない。有害物質を扱う施設の被災に伴う有害物質の流出は、水環境汚染や下流に位置する水道取水に影響を及ぼす。本章では、平常時の過去の利水障害の事例等を踏まえ、震災想定時に考慮すべき汚染評価指標を設定する。汚染評価指標に関する情報には精度のばらつきがあるが、データの様態（定量・定性・存在の有無）を考慮した分析方法を提示する。これら指標と震災ハザードにより、震災時の汚染被害発生 of 潜在的な危険性に対する考察を行う。

第6章「震災リスク軽減のための広域水道システムに関する研究」では、第3章～第5章で調査・分析した震災の影響内容を踏まえ、水道システムにおける震災リスク軽減のための代替案の設計を行う。まず、震災被害の実態から、都市生活者が必要とする水確保の場面を都市生活者のニーズや復旧過程を考慮して時間的・空間的に9つに分類する。全水道事業体や複数の事業体が提携し水道連絡管により広域的な水供給を行うことは、広範囲に被害をもたらす震災に対して有効である。水道事業体間の関係を線形計画法及びゲーム理論を適用してモデル化し、提携の可能性について考察する。水道事業体が想定する計画の中で、連絡管整備の有効性と限界を明らかとしその位置付けを明確とする。

第7章「震災リスク軽減のための下水道システムに関する研究」では、第3章～第5章までの調査・分析の結果と第6章で明確とした水道システムだけの計画の限界を踏まえ、下水処理水の利用による震災リスクの軽減のための代替案の設計を行う。まず、大都市域に存在するが殆ど利用されていない下水処理水を利用した水辺創成水路を提案する。同水路により下水処理水が都市へ開水路として送水されるが、この結果、都市生活者からみて水確保の冗長性は高まることが期待される。そして、グラフ理論を適用した評価指標により、このような大都市域水循環システムのネットワーク構造を評価する方法を提案する。さらに、水辺創成の意義を震災時の用水確保と平常時の大都市域におけるアメニティ向上の2つの側面から評価し送水量を決定する水辺創成モデルを提案する。同モデルにおいては、水循環システムをマトリクス演算として記述する方法を提示している。

第8章「総合的な大都市域水循環システムの再構成に関する研究」では、第6章と第7章で各々水道システムと下水道システムにおいて設計された代替案を都市生活者の水確保の観点から統合し、大都市域水循環システム全体としての計画を示す。まず、両代替案の調整を図る統合概念について説明し、同概念に基づく統合モデルを提示する。同モデルの統合プロセスにより、淀川大都市域の水循環システムの統合調整結果を事例として示す。さらに、本論文で述べる大都市域水循環システムの再構成に関する方法論を現状の水管理に関する制度面から考察する。

第9章「結論」では、第8章までの結果を要約し、今後の課題について述べることとする。

【参考文献】

- 1) (社)日本水道協会：水道統計（施設・業務編），1995～1996.
- 2) (社)日本下水道協会：平成5年度版下水道統計（行政編），1995.
- 3) 建設省：大阪湾水環境整備計画調査報告書，1994.
- 4) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告（ライフライン施設の被害と復旧），土木学会，1997.
- 5) 土木研究所調査団河川班：河川関係の被害，土木技術資料，1995.
- 6) 建設省近畿地方建設局：近畿地方の“水土”ランドデザインとギャラクシープラン，1996.
- 7) 厚生省水道環境部水道法研究会：水道法逐条法解説，日本水道協会，1983.
- 8) 厚生省生活衛生局水道環境部水道整備課監修：水道の耐震化計画策定指針（案）の解説，（財）水道技術研究センター，1997.
- 9) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説，1997.
- 10) (社)日本下水道協会：建設省都市局下水道部監修・下水道施設の耐震対策指針と解説（1997年版），1997.
- 11) (社)日本下水道協会：下水道の地震対策マニュアル，1997.
- 12) (財)国土開発技術研究センター編：改定解説・河川管理施設等構造令，p.109 他，（社）日本河川協会，山海堂，2000.
- 13) 萩原良巳・萩原清子・高橋邦夫：都市環境と水辺計画，勁草書房，1998.
- 14) 亀田弘行：兵庫県南部地震による都市災害について，京都大学防災研究所年報第38号A，pp.1-23，1995.
- 15) 能島暢呂・亀田弘行：ライフラインの相互連関，阪神・淡路大震災，一防災研究への取り組み一，京都大学防災研究所，pp.360-369，1996.
- 16) 清水康生・秋山智広・萩原良巳：都市域における人工系水循環システムモデルの構築に関する研究，環境システム研究，Vol.28，pp.277-284，2000.
- 17) 岡田憲夫：災害のリスク分析的見方，土木学会・土と構造物委員会「土と防災」講習会テキスト，pp.61-73，1985.
- 18) 岡田憲夫：リスクマネジメントとしてみた水資源問題（課題と展望），京都大学防災研究所水資源研究センター研究報告，pp.23-32，1992.
- 19) 萩原良巳・清水康生：地震時を想定した大都市域水循環システムの再構成に関する考察，京都大学防災研究所年報44号，pp.63-78，2001.
- 20) 清水康生・萩原良巳：震災時を想定した大都市域水循環システムの再構成のための地域分析，日本地域学会第38回年次大会，pp.163-170，2001.
- 21) 西村和司・清水康生・萩原良巳：下水処理水を利用した大都市域の水辺創成と地震被害の軽減に関する研究，日本地域学会第38回年次大会，pp.187-194，2001.
- 22) 西村和司・清水康生・萩原良巳：大都市域での下水処理水利用による水辺創成と地震

- 被害の軽減に関する研究, 環境システム研究, Vol.29, pp.369-376, 2001.
- 23) 中瀬有祐・清水康生・萩原良巳・酒井彰: 震災時を想定した大都市域水循環システムの総合的診断, 環境システム研究, Vol.29, pp.339-345, 2001.
- 24) 阪本浩一・萩原良巳・秋山智広・清水康生: 震災リスク軽減のための上水道広域連絡管に関する研究, 水文・水資源学会 2000 年研究発表会要旨集, pp.172-173, 2000.
- 25) Shimizu, Y., Hagihara, Y.Akiyama, T.: Risk Assessment of Water Supply for Disaster Considering Water Cycle Use, Preprint for 6th World Congress of the RSAI, 2000.
- 26) 萩原清子編著: 新・生活者からみた経済学, pp.1-4, 文眞堂, 2001.
- 27) 酒井彰・中瀬有祐・神谷大介・清水康生・萩原良巳: 水環境汚染リスクに関する都市生活者の意識, 日本リスク研究学会第 14 回研究発表会講演論文集第 14 巻, pp.216-222, 2001.
- 28) 酒井彰・清水康生: 流域環境汚染リスク管理手法の提案とその適用方法に関する研究, 公益信託下水道振興基金助成研究, 2001.
- 29) 清水康生・萩原良巳・西澤常彦・渡辺晴彦: 渇水時の限界節水率と給水マネジメントモデルに関する研究, 水文・水資源学会 2000 年研究発表会要旨集, pp.168-169, 2000.
- 30) 清水康生・萩原良巳・秋山智広: 人工系水循環システムモデルによる渇水リスクに関する考察, 京都大学防災研究所年報, 第 43 号, pp.85-96, 2000.
- 31) 清水康生・萩原良巳・西澤常彦: 都市域における渇水時の水利用構造評価モデルに関する研究, 京都大学防災研究所水資源研究センター研究報告第 20 号, pp.69-80, 2000.
- 32) 清水康生・萩原良巳・岩根知里: ライフスタイル概念に基づく水利用構造分析に関する考察, 環境システム研究, Vol.27, pp.81-88, 1999.
- 33) 萩原良巳・清水康生: 渇水被害軽減のための水資源計画・管理(1)リスクマネジメントのためのシステムズアナリシスの導入, 京都大学防災研究所編・防災学ハンドブック, pp.337-340, 朝倉書店, 2001.
- 34) 酒井彰・萩原良巳・清水康生・神谷大介: 都市生活者の浸水リスク認知度に関する研究, 環境システム研究, Vol.29, pp.331-338, 2001.
- 35) 堤武・萩原良巳編著: 都市環境と雨水計画, 勁草書房, 2000.
- 36) 清水康生・安田実・高野佳明: 扇状地河川の植物の生育特性と洪水の影響に関する事例研究, 土木学会第 54 回年次学術講演会, VII-43, 1999.
- 37) 竹本隆之・安田実・清水康生: 洪水が水生生物の生息に与えた影響に関する研究, 土木学会第 54 回年次学術講演会, VII-44, 1999.
- 38) 安田実・清水康生・竹本隆之: 流量変動が河川環境の維持形成に果たす役割に関する研究, 環境システム研究, Vol.26, pp.77-84, 1998.
- 39) 神谷大介・萩原良巳・坂元美智子・吉川和広: 都市域における水・土・緑の空間配置の評価に関する研究, 環境システム研究, pp.207-214, 2001.

- 40) 建設省都市局下水道部：下水処理水の広域循環利用に関する調査報告書，1995.
- 41) 建設省近畿地方建設局：淀川百年史，1974.
- 42) 小出博：利根川と淀川，中央新書，pp.185-213，1975.
- 43) 大阪市水道局：大阪市水道百年史，1996.
- 44) 大阪市下水道局：大阪市下水道事業誌第1巻，1983.
- 45) 大阪府水道部：大阪府水道部40年のあゆみ，1993.
- 46) 神戸市水道局：神戸市水道百年史，2001.
- 47) 神戸市下水道局：神戸市下水道史・下水道のあゆみ，1996.
- 48) 阪神水道企業団：阪神水道企業団五十年史，1987.
- 49) 活断層研究会編：新編日本の活断層（分布と資料），東京大学出版会，1991.
- 50) 池田安隆・島崎邦彦・山崎晴雄：活断層とは何か，東京大学出版会，1996.
- 51) 国土庁長官官房水資源部監修：'96水資源便覧，1996.
- 52) 建設省近畿地方建設局：水利権調書，1994.
- 53) 稲場紀久雄：大震災と琵琶湖の水質危機，第9回世界湖沼会議，5C-P33，2001.
- 54) 吉川和広：土木計画のシステム分析，新体系土木工学，技報堂，1980.

第2章 大都市域水循環システムモデルの構成

2-1 緒言

大都市域水循環システムの現状について考察し、水循環システムが抱える問題点を明らかにする。地震は何時発生するかわからないため、震災時を想定した対応を考えるに際しては、常に平常時の生活や都市活動を考慮しておく必要がある。このため、震災時を想定した場面だけでなく平常時の問題点についても整理する。また、問題点を解決するためには従来の事業者中心の河川・水道・下水道という個別管理の発想でなく、都市に生活する都市生活者の視点から大都市域の水循環を一体的に捉える水循環システムの再構成が必要である。本章では再構成のコンセプトを明確にすると共に大都市域水循環システムを再構成するプロセスについて説明する。本章の構成を図 2-1 に示す。

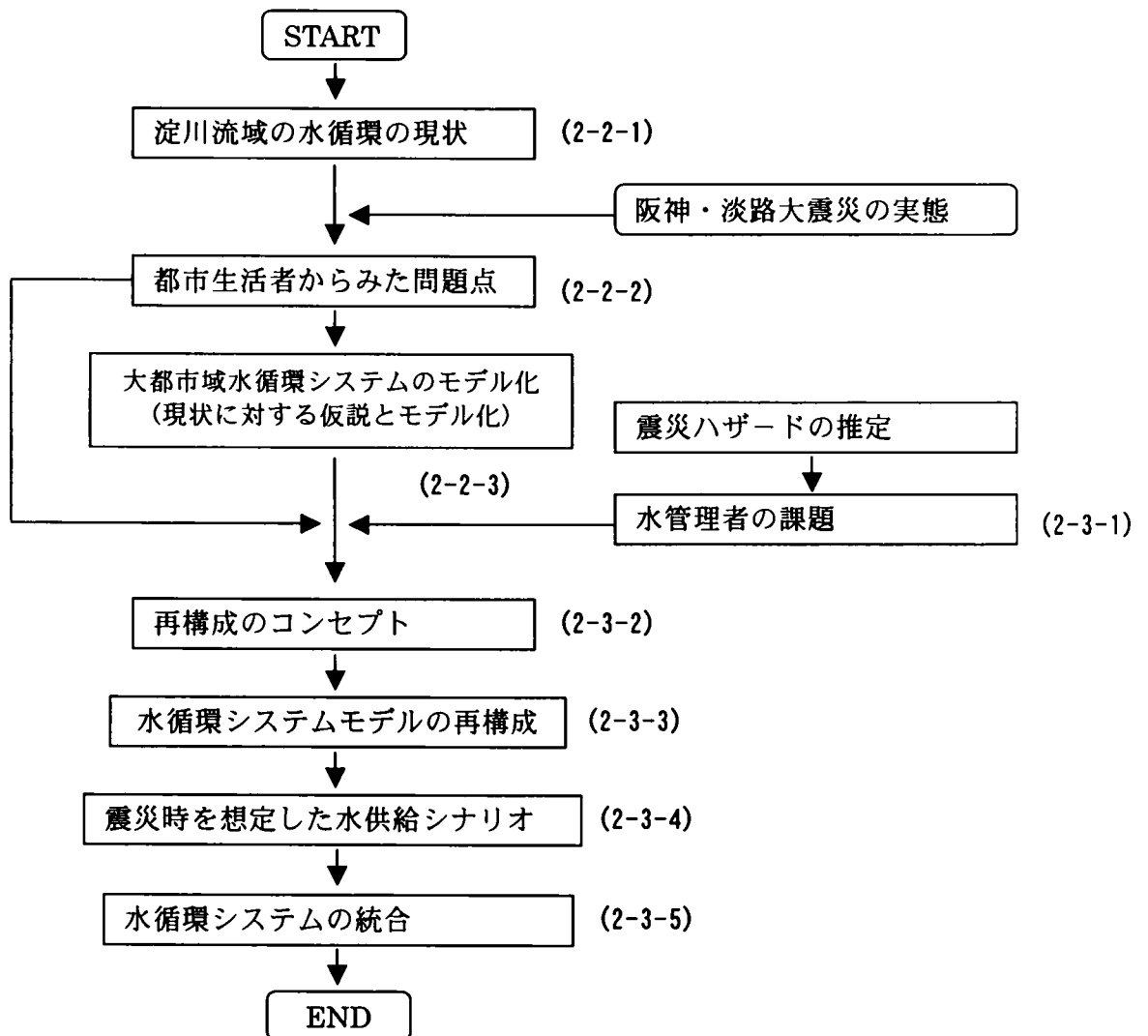


図 2-1 大都市域水循環システムモデルの再構成プロセス

2-2 水循環システムの現状

2-2-1 淀川流域における水循環の現状

(1) 水循環の概要

対象地域において淀川を水道用水の水源とする水道事業体は、京都府、大阪府及び兵庫県 の 2 府 1 県にまたがり、水源としている上水道事業の給水人口は 1317 万人に上っている¹⁾ (1993)。これは該当する行政区域内人口の 99%に相当している。次に、取排水のいずれかで淀川と係わりを持つ市町村の水源構成を河川水、地下水及びその他の 3 つに分類すると全水源の 91%が河川水であり、8%が地下水を利用している。このように多くの市町村が淀川を水道の主水源としている。一方、淀川下流部では、大阪府や兵庫県が工業用水の水源としても取水している。これらの水利用状況を水利権として府県単位でまとめると表 2-1 のとおりである。

同表より、水道用水、工業用水、農業用水及びその他に分けた水利権の合計は約 177 m³/s となる。淀川の枚方地点における平水流量が 198 m³/s であり (1952～1993 年の平均)³⁾、ほぼその 9 割に相当している。このような水量が利用可能となる一つの理由として、我が国の多くの河川流域がそうであるように上流で利用された水が再び河川に排水され、また取水するというカスケード型の水利用が行われているためである。本研究の対象区間では計 4 回の下水処理水が水道水として取水され供給されている⁴⁾⁵⁾。

表 2-1 淀川の水利権²⁾

	水道用水	工業用水	農業用水	その他	計
京都府	14.08	—	24.50	2.00	40.58
大阪府	57.92	14.01	15.02	26.98	113.93
兵庫県	14.70	7.33	—	—	22.03
計	86.70	21.34	39.52	28.98	176.54

注 1：1994 年 3 月現在の値を少数第 2 位まで示した。

注 2：京都府は京都市の琵琶湖疏水取水を含む。

資料：建設省近畿地方建設局：水利権調書，1994。

また、水利権の内訳を用水別に見ると、水道用水 49%、農業用水 22%、工業用水 12% 及びその他が 17%となっており、水道用水としての利用が約 5 割を占めている。次に、これを府県別に見ると大阪府が 65%で最も多く、次いで京都府が 23%、兵庫県が 12%となっている。淀川では、水道用水としての利用が多く、特に下流部に位置する大阪府の取水量が最も大きくなっていることが分かる。ただし、淀川の枚方大橋より少し下流にある寝屋川市浄水場取水口より下流部で取水された水道用水や工業用水は都市内で利用された後、下水処理水として淀川本川には放流されず、直接または大阪市内の河川などを通じて全て海域に放流されている。

水道事業体のうち、水道用水の水源として宇治川、木津川、淀川及び神崎川より直接取

水を行っているのは 14 事業体である。これら全ての水利権を合計すると、約 87m³/s となり、このうち、京都府分が約 14 m³/s、大阪府分が約 58 m³/s、兵庫県分が約 15 m³/s となっている。

京都府営水道は、宇治川の大ヶ瀬ダムと木津川左岸に水利権を持ち、2 つの浄水場から宇治市、城陽市、八幡市、京田辺市、久御山町、木津町、精華町の各市町に水道水を供給している。大阪府営水道は、淀川の 3 箇所計約 26 m³/s の水利権を有し、3 つの浄水場から府下 41 市町村に水道水を供給している。阪神水道企業団は、淀川右岸の 3 カ所計約 13 m³/s の水利権を持ち、3 つの浄水場を経て、神戸市、尼崎市、西宮市、芦屋市の 4 市に水道水を供給している。その他、京都市、大阪市など 11 の上水道事業体が水道水源として木津川、宇治川、淀川からの取水を行っている。

下水道事業体は流域、公共合わせて 35 事業体あり、65 の下水処理場で処理している。対象地域内における下水道整備率は、京都府 85%、大阪府 75%、兵庫県 97%、全体では 81% である。このうち、淀川、宇治川、木津川及び桂川に下水処理水が流入するのは、京都府下にある 8 処理場のすべてと、大阪府下にある 5 処理場の計 13 処理場のみである。これ以外の処理場では淀川の利水に直接関係のない都市内河川や海域、もしくは淀川に平行する河川や淀川水系以外の河川に下水処理水を放流している。13 処理場の合計放流量は、年間平均約 15 m³/s で、これは大阪市水道局における淀川からの取水量の 82% に相当する量である。このうち、特に京都市の 4 処理場からの放流量約 12 m³/s が大きい。また京都市の処理場のうち最大規模である鳥羽処理場からの放流量は全市の約 7 割を占めている。一方、上記以外の処理場から放流される放流量は約 49 m³/s である。

対象となる行政体は、政令指定都市の行政区を含めて 102 市区町村である。このうち、地下水など淀川水系以外の水源から取水し、木津川、桂川及び淀川に下水処理水を放流しているのは 6 市町で、また、宇治川、木津川、淀川もしくは琵琶湖疏水を水道水源として、宇治川、木津川、桂川、淀川に下水処理水を戻しているのは 21 市区町村である。残る 75 市区町村では、淀川から取水を行いながら、淀川に下水処理水を戻していない。この中には、高槻市や寝屋川市、守口市といった淀川に面した都市も含まれている。

対象地域における水循環システム全体を見ると、淀川水系からの水を利用している市区町村が年々増加している。下水道では、一部の処理場において淀川への放流を、淀川左岸の寝屋川へ変更する計画があり、また、京都府下からの下水処理水を流水保全水路により本川によらずに下流域に流す計画が進められている⁶⁾。

(2) 水道と下水道の概要

淀川を水源とする京都市、大阪市及び神戸市における都市の水循環システムと水利用実態の概要について説明する。京都市の水道普及率は 99.6%、大阪市は同 100.0%、神戸市は同 99.9% である（1997）。

各都市の淀川（琵琶湖を含む）への依存率は、京都市と大阪市が 100% であるのに対し神戸市は阪神水道企業団を通じて約 75% を依存している。取水位置は、京都市が琵琶湖疏

水と宇治川の2箇所から、大阪市は枚方市楠葉取水口から大阪市柴島取水口までの5箇所から取水している。神戸市は、阪神水道企業団の大阪市東淀川区柴島及び大同からの取水を水源としている。各都市の浄水場の数は、京都市が蹴上浄水場、松ヶ崎浄水場、山ノ内浄水場、新山科浄水場の4箇所。大阪市は、柴島浄水場、庭窪浄水場、豊野浄水場の3箇所。神戸市は、上ヶ原浄水場、千苅浄水場、奥平野浄水場、有馬浄水場、本山浄水場、六甲山浄水場、住吉浄水場の7箇所である。神戸市は、水源位置と地形的理由から浄水場の数が多くなっているのが特色である。

都市で使用された水は下水処理場へ取り込まれる。3都市の下水道普及率（処理区域人口／行政区域人口：1997）は、京都市98.4%、大阪市100.0%、神戸市95.7%であるから、ほぼ全量が処理場へ流入している。下水処理場の数をみると、京都市が4箇所、大阪市が12箇所、神戸市は7箇所である。これら下水処理場からの処理水の放流先は、京都市が桂川・宇治川で淀川本川に繋がる河川へ放流しているのに対し、大阪市は神崎川・寝屋川などの市内河川、神戸市は鈴蘭台処理場を除いて大阪湾に直接放流している点が特色である。

2-2-2 都市生活者からみた水循環システムの問題点

(1) 震災時に必要となる用水の不足⁷⁾⁸⁾

阪神・淡路大震災の被災地域では、次のような問題を生じた。震災の際、まず、必要となった用水は火災に対する消防用水である。被災直後はほとんどの地域で水道が使用できなくなったため、消火栓が機能せず消火活動を十分に行うことができなかった。そこで現場では、防火水槽、プール、河川、海などから消防用水を得ようとした。河川水と海水は消火栓が機能しなくなり防火水槽の水も尽きた後に消防用水として主に利用された。しかし、神戸市内を流れる河川の流量は偏在しており総じて少ない。河川整備は洪水を速やかに海に流すよう改修を進めており護岸が高く貯水機能も少ない。結果として消防用水の不足は大規模火災の一因となってしまった。この消防用水の確保が第1に重要である。

次に、避難所生活や被災した家での生活を送るのに飲料水やトイレ用水の不足が問題となった。被災者に対するアンケート調査⁹⁾（日本水環境学会：阪神・淡路大震災による水環境への影響と対策、1997）から要約すると、まず、被災直後は飲料水の不足に対しては市販水（ペットボトル）を利用し、次いで復旧が進むにつれて給水車からの供給水を利用している。トイレ用水は、震災直後に自宅での生活が可能であった場合には風呂の残り湯などを利用し復旧が進むに従い給水車からの水を利用している。自宅での生活が困難である場合には避難所など自宅外のトイレを利用している。洗濯や風呂は、被災直後はほとんど行われていないが日数が経過するにつれて避難所など自宅外で行われている。自宅に井戸を保有している世帯では飲料水、トイレ用水、風呂・洗濯用水など全ての用途で震災直後から井戸を水源として利用している。このため井戸保有世帯では使用水量が非保有の世帯よりも多い。また、被災建物の撤去の際に必要な防塵用水の不足も問題となった。

上述のように都市生活者がどのような場面でどのような水が必要かということは重要で

ある。これらに対して水道、下水道、河川の管理者の誰が水を供給するかは生活者にとって関心事でなく、どれだけ必要な水を確保できるのかが問題である。

(2) 大都市域における水辺の減少

従来の都市河川の整備は治水機能の確保が優先され、その結果として急勾配のコンクリート護岸やフラットな河床に代表されるように本来河川の有していた親水性、生物の生息場としての機能が喪失してしまった。また、流域の舗装の進展や下水道の整備により流域の保水、浸透機能が低下し、下水処理水が下流部あるいは海域へバイパス放流されることが原因で平常時の河川流量の減少を生じている。このことは河川形状の単一化と相まって降雨の時以外は水が流れない排水路のような河川を作り出した。

1973 年以降、市街地で多発する浸水問題に対処するため、都市域では流域面積 200ha 以下の河川は下水道として管理されることになり、水路や小河川は埋め立てや地下化（覆蓋化）により多くの水辺が消えた。また、一部の流域面積 200ha 以上の河川も、市街化を進めるために不要であるという理由からその姿を消した。例えば大阪市では、長堀川が駐車場建設のために、正蓮寺川が交通整備のために埋め立てられるなどして、戦後から現在に至るまでに水辺の約 40% が失われてしまった¹⁰⁾¹¹⁾。

上述のように都市河川の多くは、平常時は水が少ない状態であったり覆蓋化されていたりする。このことは、都市生活者のアメニティにとって貴重な水辺空間の喪失をも招いてしまったと言える。今日、都市生活者にとってのアメニティ向上のために、都市の水辺を復活させることが求められている¹²⁾。

2-2-3 水循環システムのモデル化¹³⁾¹⁴⁾

(1) 現状の水循環システムに対する仮説

現状の水循環システムは、河川、水道、下水道の管理者による個別事業の整備が前述のように進んでいる。ここでいう整備の目的は、河川であれば治水・利水・環境であり、水道であれば普及率の向上、平常時の安定供給と給水サービスの向上（おいしい水）等、下水道であれば整備の推進による環境改善等というものである。しかし、都市域の現象としての水の流れは水循環を構成しているが、それは水管理者から水循環システムとして認識されていない。このことは、前述したように震災時の用水不足や都市アメニティの問題として表出していると考えられる。

(2) モデルの基本構造

大都市域水循環システムの基本構造は、現象としての水循環システムを表しかつ前項で述べた問題点を記述できる枠組みでなければならない。そのためには粗くとも大都市域の水循環経路をネットワークとして明示的・一体的に記述する必要がある。これは震災リスクの軽減が、供給水量の多寡についての議論と共に循環経路について認識を持つことが重要であり減災に結びつくと考えためである。

本研究では、水循環システムを水を管理する主体としての「河川」「水道」「下水道」と

水を利用し都市活動や生活維持を行う「都市活動」の4つのレイヤーから構成されたと考える。各レイヤーを位置エネルギーの大小関係を考慮した降順の階層構造として表す。この理由は、階層間の水循環経路を明確化し水循環をネットワークとして捉えることを可能とするためである。この水循環システムのネットワークは、水の循環経路を記述するだけでなく“水輸送”“水質変換”及び“貯留”のいずれかの機能を有する多くの要素によって構成される。すなわち、河川であれば河川構造物、流路、水道であれば浄水場、水道管、下水道では下水処理場、下水管渠などである。

また、各レイヤーには、河川管理者、水道管理者、都市生活者及び下水道管理者という意志決定者が存在する。このため、GIS（Geophysical Information System）で用いられる地理情報を構成する主題の意味ではなく、階層システム論の観点からこれらをレイヤーと称している。大都市域水循環システムモデルは、河川レイヤー(river layer)・水道レイヤー(water supply layer)・都市活動レイヤー(urban activity layer)及び下水道レイヤー(sewerage layer)から構成される階層構造を有する。

以上に述べた水循環システムモデルの概念を図2-2に示す。同図の水循環システムは前述のように現状の水循環システムをモデル化したものである。このため、レイヤー間の水移動は経路が限定され、レイヤー内においても事業体相互の関係は構造化されていない。

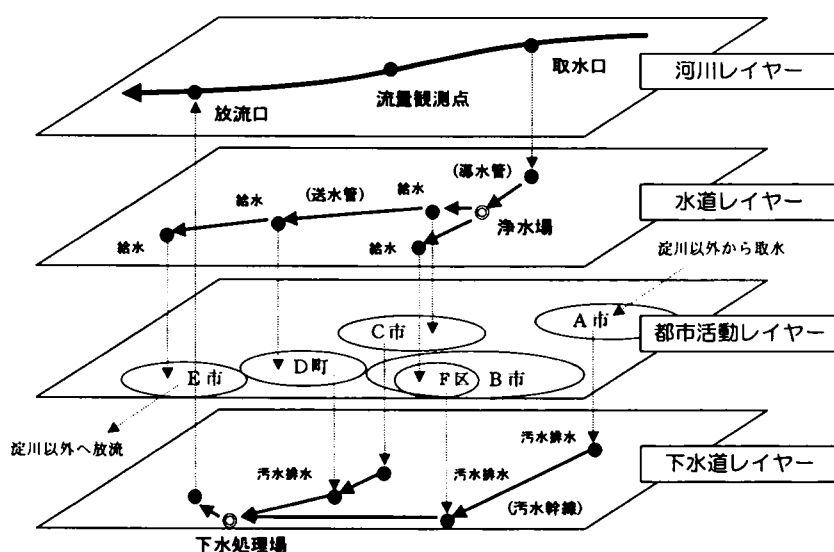


図2-2 大都市域水循環システムモデルの概念

この水循環モデルは、図2-3に示すように空間スケールでも階層構造を有する。すなわち、水循環システムの階層は、河川の流れや都市の位置がわかる（言い換えると“川がみえる”）「流域レベル（regional level）」、都市内までわかる（言い換えると“町がみえる”）「都市レベル（urban level）」及び生活している人間の様子までわかる（言い換えると“人がみえる”）「都市生活者レベル（residential level）」の3レベルである。

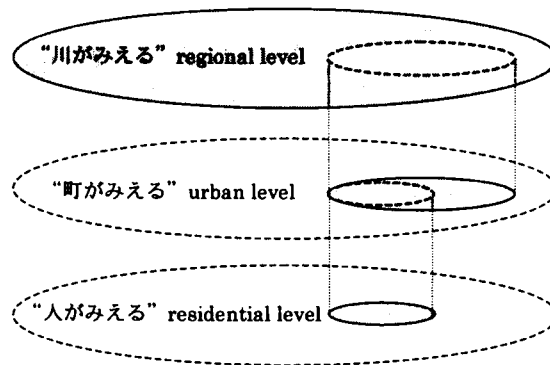


図 2-3 モデルの空間的階層構造

震災に関する各レベルの要素の状態量は、空間スケールに見合った時間スケールでモデル化される必要がある。例えば、流域レベルの場合、各構成要素の状態量は大都市域全体の変化を記述する時間単位として年間平均値データで記述される。

一方、都市生活者レベルでは、日単位や時間単位で現象を見る必要がある。このように、どのような被害内容を対象とするか、また、どのレベルの空間スケール（時間スケール）でモデル化するかによって水循環システムモデルの構成要素は異なってくる。例えば同じ震災を対象としても、広域的な水供給が行われている水道用水供給事業までをマネジメントの対象と考える場合には、たとえ想定する被害内容の空間スケールが小さい場合であっても水道用水供給事業の管理主体はモデルに内部化しておく必要がある。

(3) 淀川大都市域のモデル化に際しての仮定

淀川大都市域を対象とした流域レベルのモデル化の事例を示す。各レイヤーの水循環構成要素について以下のように考える。河川レイヤーでは、淀川水系のうち、木津川、宇治川、桂川、淀川を水源河川として考える。また、取水された水道用水が人工系水循環を経由して再び下水処理水の形で河川に放流されている場合、その河川について下水処理場の放流口から海域に至るまでの区間も対象とする。

【都市活動レイヤー】

都市活動レイヤーでは、末端の事業者や水利用者をモデル化するのではなく、行政体を一つの都市活動の場としてモデル化する。対象となる行政体は、水源河川からの水道水の供給を受けている市町村であるが、政令指定都市については、政令指定都市とそれ以外の行政体との人口規模を考慮して行政区単位とする。また、水供給地域以外の行政体でも、対象地域内の宇治川、木津川、桂川、淀川に下水処理水を放流している都市については、モデルに内部化する。

【水道レイヤー】

水道レイヤーでは、河川で取水された水が、浄水場を経て供給先である市区町村に届けられるまでのモデル化を行う。モデル化は次のとおり考えるものとする。

- ① 淀川を水道水源としている水道事業体の水道施設を対象とする。

②水道ネットワークについては、供給先である都市活動レイヤーの市区町村までの主要管路（導水管・送水管）を対象にモデル化する。市区町村内の水循環については本モデルでは議論しない。ただし、政令指定都市は送水管に限定すると全ての行政区まで水供給が届かない。その場合は行政区にとって重要な幹線の配水管までを対象とする。

③政令指定都市以外の上水道事業体が水源河川から取水し自市に供給している場合は、取水した時点でその市に淀川の水が届いていると見なし、ネットワークとしては考慮しない。なお、上水道事業体から隣接市町村への分水がある場合も同様とする。

④琵琶湖疏水は、人工構造物であり震災時に崩壊の恐れもあることから河川レイヤーでは扱わずに導水路として水道レイヤーの中で扱う。

【下水道レイヤー】

都市活動レイヤーから排出された下水（汚水）が処理場に集められて河川または海域に放流されるまでのモデル化を行う。モデル化の仮定を以下に示す。

①水源河川である淀川、宇治川、木津川、桂川に下水処理水を放流している下水道事業体の下水道施設、または、河川レイヤーから水道用水の供給を受けている市区町村からの下水を処理している下水道施設を対象とする。

②市区町村内の水循環については議論しないため、対象とする下水道管は、市区町村から処理場までの幹線管渠とする（流域面積の大きさで定義されるいわゆる幹線とは異なる）。

③政令指定都市以外の公共下水道事業体が自市内から集めた下水を処理して河川レイヤーに放流している場合は、都市内の水循環となるため、その管渠ネットワークについては対象としない。また隣接市町村からの下水を受け入れている公共下水道事業体についても同様である。

以上より各レイヤーの接点は、河川と水道が「取水口」、水道と都市活動が「給水」位置、都市活動と下水道が「汚水排水」位置、下水道と河川が「放流口」になる。

2-3 水循環システムの再構成¹⁴⁾

2-3-1 震災ハザードと水管理者の課題

水循環システムの再構成を考えるに当たっては前述の都市生活者の視点からの問題点と共に水循環システムを構成する、河川、水道、下水道の管理者自身が抱える以下のような課題について考慮する必要がある。

(1) 震災ハザードの存在¹⁵⁾

淀川大都市域は近畿三角地域と呼ばれる活断層の多数存在する地域に位置している。震災に対する水循環システムを診断するためには、流域レベルの広範な地域を対象とした震度分布の推定が必要である。阪神・淡路大震災の後、多くの自治体は、活断層による地震の影響を改めて検討するために防災計画の見直しのための地震被害想定調査を行っている。しかし、これら見直しの内容は、計画を作成する自治体の行政区域内だけを対象とした震

度推定結果に基づいており、周辺までを含めた震度の推定は行われていない。また、震度の推定方法や精度も各自治体で異なっている。この点を考慮し清水・萩原らは大都市域水循環システムの診断を目的として、活断層による地震の震度推定を行っている¹⁶⁾。この結果、6つの活断層系（花折断層・西山断層・生駒断層・有馬高槻断層・上町断層・六甲断層）による地震が淀川流域内の水循環システムに影響を及ぼすことが明らかとなっている。

(2) 水管理者の課題

①震災時の水循環システムへの影響⁵⁾¹⁷⁾

水循環システムへの影響について、清水・阪本らは前述の震災ハザードで震度7の区域に水循環システムの施設が立地している場合には、施設機能が停止すると仮定し、その影響を考察している。この結果、活断層による地震を想定した場合、対象地域内の多くの都市では水循環システムが影響を受ける可能性があるとして指摘されている。このため、水管理者は、震災ハザードに対する対策を講じる必要がある。

②震災時の水道水源汚染¹⁷⁾¹⁸⁾

震災時を想定した時、その影響は①で述べた水循環システムを構成する施設に限らないことが、清水・中瀬らの研究で指摘されている。すなわち、有害物質を取り扱う工場や廃棄物処分場などからの有害物質の水域への流出が考えられる。その影響は、直接の被害対象として人や生態系が考えられ、間接被害として水質悪化による利水障害が挙げられる。この利水障害は重要な問題である。水供給施設への影響が無くとも水源である淀川が汚染されることは水道事業者にとって致命的な事態である。上流部に位置する工場や産業廃棄物処分場などが被災することにより下流への水道取水への影響が重大である。水管理者は、水供給施設への直接被害だけでなく、水源汚染をも考慮した対策が必要である。

③水道施設（浄水場）の稼働率の低下¹⁹⁾

近年、水資源開発の計画時に想定した水需要が伸び悩んでいる。水道事業体における施設の年間平均稼働率（一日平均給水量／施設能力）は、淀川を水源とする主要3都市で見ると京都市が64.1%、大阪市が62.9%、神戸市が57.5%となっている（1998）。最大稼働率（一日最大給水量／施設能力）でも、京都市が80.6%、大阪市が75.9%、神戸市が66.3%である（同年）。水利権を有しかつ浄水施設の能力が有るにもかかわらず利用されない状態は水道経営にも影響をもたらす。水道管理者にとってこの点は課題である。震災を想定した時、このような水循環システムにおける水質変換機能を有効に利用し、被災した他都市への水供給を図ることが考えられる。

2-3-2 再構成のコンセプト

以上の考察を踏まえて大都市域水循環システムを再構成するコンセプトを以下のように考える。

(1) 震災時における生活の維持と都市活動を可能とする

震災時に必要となる用水の水源は、水道水でなくとも河川水または貯留水（水道水・下

水処理水)でも構わない。このような状況下では、都市内の水辺を利用することが有効である。飲料水は、水道水か貯留水(水道)に限られるが、消防用水やトイレ用水は水道水でなくとも下水処理水や河川水でも問題ない。飲料水として有効に水道水を利用するためにはトイレ用水を水道水以外で代替えることも考えられる。また、都市域の事業所の多い地区では、そこで働く都市生活者の水を確保することが重要となるが、使用する水量の代替えについては前述の内容と同様のことがいえる。

生活者の視点から必要な場面で必要な用水を各階層から集約できる水循環システムとしておく必要がある。

(2) 平常時における大都市域の水辺創成を図る

都市河川の多くは、平常時に流量が減少していたり覆蓋化されていることが多い。このような喪失した水辺の創成は、河川管理者だけの問題でなく、大都市域水循環システムという枠組みの中で総合的に考える必要がある。都市生活者にとっては都市域における貴重なアメニティ空間の確保という意義がある。

(3) 水確保のために大都市域水循環システムを一体的に考える

活断層による震災ハザードの空間的広がり、市町村や府県単位を原則とする事業者(水道・下水道)の管理区域(給水区域・処理区域)の大きさを遙かに超えている。このためひとたび地震が起これば被害は広範囲に及び単独の事業者での対応は困難である。また、各事業者は何れかの活断層による震災ハザードを有しており、お互いが地震によって被災する可能性のあることを認識している。このため震災時を想定し互助の認識を共有することが可能なはずである。このことは、事業者が広域的に防災・減災計画のために提携し得ることを示唆している。

(1)(2)の目的を実現するためには手段として河川・水道・下水道の事業者が協力して震災に対応する必要がある。このことから(3)の大都市域水循環システムとしての一体的なマネジメントが求められている。

2-3-3 モデルの再構成

都市の水利用実態と供給特性を踏まえ、以上に述べたコンセプトに基づく水循環システムの再構成を考える。このための新たな構成要素をレイヤー毎に示せば以下のとおりである。ただし、施設の耐震化は防災対策として重要であるが、河川・水道・下水道の各事業者に共通するため、ここでは輸送・水質変換・貯留に関する対策を示す。

(1) 水道レイヤー

①水道水の施設内貯留

水道水を水道施設内に貯留し、震災時に主に生活用水(飲料水等)として供給する。

②水道連絡管による水供給

事業体内の幹線管路を耐震化された水道管で相互に連絡し、何れかの事業体で水量不足を生じた時、水量的に余裕のある場合は相手に水供給を行う。連絡管を想定する時、水道

事業者は配水ブロック化計画において幹線管路の整備を既に行っていると仮定する。

③地下水等の自己水の利用

地下水や淀川以外の河川等の新たな水源を利用する。

(2) 下水道レイヤー

①下水処理水の利用

高度処理した下水処理水を都市内に循環させ、平常時は都市生活者のための環境創成用水として利用し、失われた水辺の創成を図る。震災時には、消防用水、生活用水（トイレ用水・洗浄用水等）として利用する。都市内に送水された処理水は、どのように利用されたかにより再び下水処理場に流入する場合もあるが（生活用水として利用）、そのまま河川へ流出する場合もある（流末での河川放流や消防用水として利用された場合）。すなわち、環境創成用水として送水された時点で下水道管理者の手を放れ都市生活者の水になっていると解釈できる。したがって、環境創成用水は都市活動レイヤーに位置付けられる水である。

②下水処理水の都市内貯留

下水処理水を都市内の公園地下や公共施設の地下等に貯留し、震災時に消防用水、生活用水（トイレ用水・洗浄用水等）、防塵用水として利用する。

(3) 河川レイヤー

①工業用水の転用及び施設の利用

用水が不足した際に工業用水を転用し、水道の取水施設や導水管路が被災した時に工業用水の取水施設を利用して水道用水の取水を行うことが考えられる。後者の事例として、阪神・淡路大震災の際には神戸市が淀川水系神崎川に位置する工業用水道の取水施設から緊急取水を許可されている。

②農業用水の転用及び施設の利用

震災時に、農業用水を転用して利用することや水道の取水施設が影響を受けたとき農業用水の取水施設を利用して取水しその水を浄水場へ導水することが考えられる。代掻き期など農業用水を多量に使用する時期を除いて、このような利用を考えることができる。

以上が新たな水循環システムを構成する要素である。ただし、河川レイヤーの対策については、本論文で工業用水道と農業用水を対象としないため、以下の分析からは除くものとする。

再構成された水循環システムの概念図を図 2-4 に示す。震災時には、都市生活者の必要とする用水を確保するために各レイヤーからの水供給は都市活動レイヤーに集約される。図 2-2 に示した現状の水循環システムとの違いは、各レイヤー内及びレイヤー間において事業者が水を相互に供給している点である。このため、震災時を想定してもシステム内の水移動が活発となっており、複数の系統から柔軟に都市活動レイヤーに水を集約できる構造となっている。

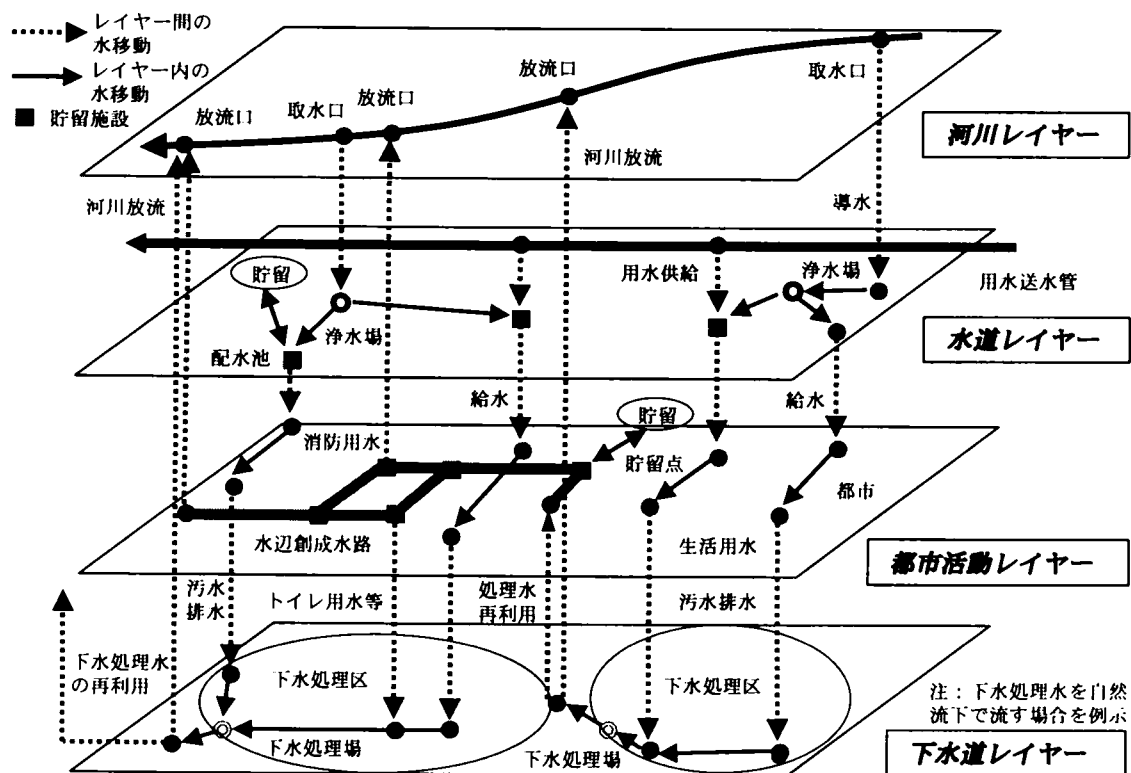


図 2-4 大都市域水循環システムの再構成の概念

2-3-4 震災時を想定した水供給シナリオ

水循環システムの新しい構成要素は、各々の機能しない場面が存在するため、震災時に全て同時に機能するわけではない。例えば、前述のように地震による水源汚染や地下水汚染が予想される。淀川の水源汚染は、流下時間を考慮すれば数日以内で終息すると考えられるが、その間は水源を利用できない。また、都市生活者が必要とする用水も被災直後から内容が推移することが考えられる。

これらの点を考慮し、被害内容と必要用水及びそれらに対する対策を地震発生後の時間経過に沿って整理すれば表 2-2 に示すシナリオを想定することができる。表中の○印は各場面で特に重要となる項目である。これらの想定内容は、震災時の大都市域水循環システムを再構成する時の基本的な設計図となるものである。しかし、他の大都市域でこれと同様な想定が当てはまるわけではなく、例えば水源河川が複数であるか否か、取排水が上流からカスケード的であるかなどによって震災に対する対策も変わってくる。表 2-2 は、あくまで淀川の現状、震災ハザードの水循環システムへの影響、都市での水利用実態を踏まえて想定したものである。都市生活者への影響を軽減するためには、水道システム、下水道システム及び河川システムにおける全ての対策が関係する。これらの対策により、いつどのように都市生活者に水供給するかが重要である。

このために、まず、表中の被害内容について知ることを目的として、震災による都市活動、水循環施設及び水道水源への影響を分析する必要がある。

表 2-2 震災後の被害と対策のシナリオ

事象分類	想定する要因		地震発生後の時間経過		
			混乱期 (3 日間)	応急対策期 (7 日間)	復旧期 (以降)
被害	水道レイヤー	施設被害	○	○	○
	河川レイヤー	河川水汚染（水源）	○		
		地下水汚染（水源）			○
必要用水	都市活動レイヤー （都市生活者）	消防用水	○		
		飲料水	○	○	○
		トイレ用水		○	○
	水道レイヤー	水道復旧用水		○	○
対策	水道レイヤー	施設内貯留（上水）	○		
		水道連絡管利用		○	○
		他水源の利用	○	○	○
	都市活動レイヤー	都市内貯留（処理水）	○		
	下水道レイヤー	下水処理水利用	○	○	○

注：各場面で特に重要となる項目に○印を付けている

資料：参考文献 6)～9) 20)～22)

次に必要水量を確保するための各レイヤーの対策について述べる。水道事業者が可能な行動は、施設の耐震化による水供給ルートの確保、水道水の施設内貯留水の確保、水道連絡管による他の事業者からの水供給及び地下水等の自己水源の利用である。震災被害が広域に及ぶことを前提とする必要があるため、有効となる対策もそれを踏まえた広域的な内容とする必要がある。このため、水道事業者の対策としては、従来その整備が積極的に行われていない水道連絡管が有効な対策と考えられる。

これら対策によってどれだけ水供給すべきかについては、下水道事業者の下水処理水利用や処理水の都市内貯留水の利用可能量によって変わってくる。したがって、水道事業者の対策を検討する際も他の事業者の対策を考慮しておく必要がある。下水道事業者の立場から検討する場合も同様である。

2-3-5 水循環システムの統合

ここで、水道事業者が連絡管によって広域的な提携を図る場合と、下水道事業者が下水処理水を利用した水辺創成という広域的な水循環を図る場合の条件の相違について述べる。

水道の場合には何れの事業者と提携する場合も圧力管による連絡となるため事業費は問題であるが、連絡そのものは何れとも可能である。要は連絡管により水道ネットワークを構成した時に都市生活者の用水を確保する観点から提携の意義が高いか否かである。これに対して下水処理水を利用する場合は、下水処理場が供給する相手は他の下水処理場ではなく、都市活動レイヤーの都市生活者である。送水する方法として水路による自然流下を原則とするならば（ポンプ圧送も不可能ではないがコスト面から現実的でないと考える）、自ずと供給可能区域は限定される。したがって問題は、下水処理場が他の都市へ処理水を供給するかしないかではなく、供給可能な都市に対してどのような水量配分をすることが

減災及び都市アメニティの観点から有効かということである。このように前者は提携の可能性について、後者は処理水の配分についての分析が重要である。そして、これら各レイヤーでの分析結果を踏まえて河川レイヤーを含めた大都市域水循環システムの統合のための分析が必要となる。

以上のように水道レイヤーと下水道レイヤーでの分析のためのアプローチは異なる。以下に分析内容を述べる。

(1) 水道レイヤー²³⁾

震災時に水道事業者が供給することのできる水量はどの程度であるかについて分析する。想定するシナリオは、表 2-2 の通りである。各場面で震災により想定される被害（供給施設の被害・水源汚染・地下水汚染）と必要用水の種類（消防用水・飲料水・トイレ用水等）は異なる。

各レイヤーで対応可能な対策を、水道が施設内貯留（上水）・連絡管、下水道が下水処理水利用・都市内貯留（処理水）とする。水道システム内で対応可能な対策によって都市相互が提携することにより必要水量をどの程度確保できるかについて分析する。ここでは下水道システムからの水供給は無いと仮定する。

前提として提携する事業体間にはどのような行動をとるかの合意があると考え、ゲーム理論を適用し提携の可能性を分析し、水道事業体が各場面で対応可能な内容を明確にする。

(2) 下水道レイヤー^{24) 25)}

下水道システムとして可能な対策は、下水処理水利用と処理水の都市内貯留である。この都市内貯留は、下水処理水を都市内に循環させる経路上での貯留が可能である。従って、処理水を震災時の消防用水・トイレ用水等として利用でき、かつ平常時において都市の水辺空間のアメニティを高めるよう如何に都市に配分するかが問題となる。まず、下水処理場で震災に備えてどの程度まで必要水量の確保が可能かを分析し、次いで処理水の都市への配分方法について平常時の都市アメニティの向上の観点をも考慮して分析する。

この際、都市活動レイヤーの必要水量に対して、下水道レイヤーから供給する水量は水道レイヤーからの供給量にも依存し、それらを踏まえた下水処理水の配分を行うことが必要である。しかし、ここでは都市活動レイヤーと下水道レイヤー間の水循環を対象とし、他のレイヤーとの関与は与件とする。このような条件の下で下水処理水を各都市に配分する水辺創成モデルを提案する。

(3) 水循環システムの統合²⁶⁾

前述の分析では、水道システムでパラメータとした要因は下水道システムの分析では決定変数となっている。また、下水道システムの分析でパラメータとした要因は水道レイヤーで決定変数となっている。水道システムと下水道システムの両者を統合したモデルが必要となる。この統合を行う調整者（coordinator）は、あくまで都市生活者である。大都市域水循環システムを全体システムとするならば、水道システムと下水道システムは、そのサブシステムであり、それらを都市生活者の論理で統合するモデルとする。都市生活者の

評価基準としては、各場面における必要水量の確保、全体費用の最小化の2つを考える。後者の費用については、水道料金や下水道料金等として、形は違うが何れも都市生活者から徴収されている。全体費用の最小化は都市生活者にとって意義があると考えらる。

2-4 結言

本章では、対象地域である淀川大都市域水循環システムの概要を述べ、現状の問題点を明らかとし、再構成の必要性を述べた。それらを踏まえ、水循環システムを再構成する以下のコンセプトを提示した。

①震災時における生活の維持と都市活動を可能とする

震災時の生活の維持と都市活動を可能とするために、都市生活者の視点から必要な場面で必要な用水を各階層から集約できる水循環システムとする。

②平常時における大都市域の水辺創成を図る

大都市域の水辺創成は、都市生活者のアメニティ向上にとって重要である。河川管理者だけの問題でなく大都市域水循環システムという枠組みの中で総合的に考える必要がある。

③水確保のために大都市域水循環システムを一体的に考える

震災に対して、各事業体は互助の認識を共有することが可能であり、広域的に提携し得る。①②の目的を達成するための手段として、提携による大都市域水循環システムの一体的なマネジメントを図る必要がある。

また、現状の水循環システムを再構成する枠組みとして大都市域水循環システムモデルを提示した。同モデルは、大都市域の水循環システムをネットワークとして明示的・一体的に記述するため、水を管理する主体としての「河川」「水道」「下水道」と水を利用し都市活動や生活維持を行う「都市活動」の4つのレイヤーから構成される階層構造と考えた。この水循環システムのネットワークは、水の循環経路を記述するだけでなく水輸送、水質変換及び貯留のいずれかの機能を有する多くの要素によって構成されている。さらに、同モデルは、空間的にも流域レベル、都市レベル及び都市生活者レベルの3階層から構成される。本研究は、淀川大都市域を流域レベルで考察するものである。

そして、上記モデルに基づく、大都市域水循環システムの再構成の方法論を論じた。

【参考文献】

- 1) (社)日本水道協会：水道統計（施設・業務編），1994.
- 2) 建設省近畿地方建設局：水利権調書，1994.
- 3) (社)日本河川協会：流量年表，1995.
- 4) 塩路勝久・清水康生：河川水中の下水処理水割合を指標としたカスケード型広域循環利用に関する考察－淀川流域を対象として－，下水道協会誌， Vol.34, No.409, pp.63-72, 1997.

- 5) 清水康生・萩原良巳：震災時を想定した大都市域水循環システムの再構成のための地域分析，日本地域学会第38回年次大会，pp.163-170，2001.
- 6) 日本水環境学会編：日本の水環境5近畿編，技報堂出版，2000.
- 7) 神戸市消防局編：阪神・淡路大震災における消防活動の記録，1995.
- 8) 神戸市水道局：阪神・淡路大震災水道復旧の記録，1996.
- 9) 日本水環境学会：「阪神・淡路大震災による水環境への影響と対策」報告書，1997.
- 10) 堤武・萩原良巳編著：都市環境と雨水計画，勁草書房，2000.
- 11) 大阪市：大阪のまちづくり一きのう・今日・あす，1991.
- 12) 高橋邦夫：都市域における水辺計画に関する研究，京都大学学位論文，2001.
- 13) 清水康生・秋山智広・萩原良巳：都市域における人工系水循環モデルの構築に関する研究，環境システム研究，Vol.28，pp.277-284，2000.
- 14) 萩原良巳・清水康生：地震時を想定した大都市域水循環システムの再構成に関する考察，京都大学防災研究所年報44号，pp.63-78，2001.
- 15) 活断層研究会編：新編日本の活断層（分布と資料），東京大学出版会，1991.
- 16) 清水康生・萩原良巳・阪本浩一・小川安雄・藤田裕介：水道システムの診断のための震災ハザードの推定，土木学会関西支部講演会，IV-80，2001.
- 17) 阪本浩一・清水康生・萩原良巳：震災ハザードに対する都市水循環システムの診断に関する一考察，土木学会年次学術講演会，IV-228，2001.
- 18) 中瀬有祐・清水康生・萩原良巳・酒井彰：震災時を想定した大都市域水循環システムの総合的診断，環境システム研究，Vol.29，pp.339-345，2001.
- 19) (社)日本水道協会：水道統計（施設・業務編），1999.
- 20) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告・ライフライン施設の被害と復旧，1997.
- 21) 平成7年度文部省科学研究費(総合研究A)研究成果報告書：平成7年兵庫県南部地震の被害調査に基づいた実証的分析による被害の検証，1996.
- 22) 法政大学大学院都市問題研究プロジェクト：阪神・淡路大震災に学ぶ・震災時の用水確保方策に関するシンポジウム講演集，1997.
- 23) 阪本浩一：大都市域水循環システムにおける震災リスク軽減に関する研究，京都大学大学院工学研究科土木システム工学専攻修士論文，2001.
- 24) 西村和司・清水康生・萩原良巳：下水処理水を利用した大都市域の水辺創成と地震被害の軽減に関する研究，日本地域学会第38回年次大会，pp.187-194，2001.
- 25) 西村和司・清水康生・萩原良巳：大都市域での下水処理水利用による水辺創成と地震被害の軽減に関する研究，環境システム研究，Vol.29，pp.369-376，2001.
- 26) M.D.Mesarovic,D.Macko,Y.Takahara：研野和人監訳・木村靖夫・中村達也・小島俊夫共訳，階層システム論，共立出版，1974.

第3章 大都市域における水利用実態に関する分析

3-1 緒言

本章では、震災の影響を考慮した分析を行う前段として、対象地域である淀川大都市域における淀川の水利用の実態を調べるものとする。まず、水道事業体の水源状況を調べ、淀川からの取水が水道水源にとって重要な位置付けであることを検証する。また、淀川には水道取水だけでなく下水処理場からの放流が行われている。水道取水と下水処理水の放流による河川を介した水循環について考察を行う。

次いで、震災時に断水が生じた時の都市活動への影響を調べることを目的に、市区町村単位で家庭用水と都市活動用水の水利用実態を整理する。大都市域における水利用量の分布は、産業従業者・昼間人口（就業者・通勤者等）・事業所の分布など都市活動を表す要因と密接な関連を有する。このため、これら要因の実態について調べ用途別の水利用量との関連を考察する。さらに、主要な要因を対象として総合的な考察を行うことを目的に、主成分分析を用いて市区町村を分類し震災に対する都市活動影響ポテンシャルの大きさについて分析する。

震災被害は、水循環システムとは直接関係しない都市環境要因によっても助長され軽減される。例えば、被災後の火災時に延焼を引き起こす木造住宅が集中する地域や消防用水に利用できる河川などの水辺が存在しない地域である。これら都市環境要因の淀川大都市域における実態を調べ、本研究で対象とする水循環システム（水道・下水道・河川）の防災・減災用水としての位置付けを明らかとする。

3-2 水源からの取水状況

3-2-1 水源構成

対象地域の水道用水の水源としては、淀川・他河川・地下水・その他がある。これらの構成を整理した結果を表3-1に示す。

対象地域の水道水源は、90%を淀川（対象区間である木津川・宇治川・桂川・淀川本川）に依存し、残り6%を地下水に4%を他河川に依存している。淀川という1つの水源に集中した取水形態となっていることがわかる。また、この90%の内訳は、85%が京都市上水道・大阪市上水道・神戸市上水道・京都府営水道・大阪府営水道及び阪神水道企業団によって供給され、残る5%は9つの事業体（宇治市、京田辺市、枚方市、寝屋川市、守口市、吹田市、尼崎市、伊丹市、西宮市）が淀川から直接取水している。

これらの都市は、伊丹市を除いていずれの都市も前述の水道用水供給事業からも受水しており、前述の5つの事業体が対象地域における水供給の要となっていることがわかる。

表 3-1 対象地域の水道水源からの取水量¹⁾単位：千 m³/日

対象地域の区分		淀川	他河川	地下水	その他	計
京都府	京都市上水道	780	0	0	0	780
	その他の都市	85	0	86	0	170
	(京都府営水道)	(82)	0	0	0	(82)
大阪府	大阪市上水道	1,573	0	0	0	1,573
	その他の都市	1,908	124	208	4	2,244
	(大阪府営水道)	(1,669)	0	0	0	(1,669)
兵庫県	神戸市上水道	450	102	0	28	581
	その他の都市	348	5	29	5	386
	(阪神水道企業団)	(301)	0	0	0	(301)
全体	対象地域合計	5,144	232	322	37	5,735
	6事業体合計	4,856	102	0	28	4,986

注1：阪神水道企業団は神戸市を除く芦屋市・西宮市・尼崎市分である。

注2：「淀川」には琵琶湖疏水・ダムからの直接取水分を含む。

注3：1996年度時点のため、京都府の「その他の都市」では長岡京市・向日市・大山崎町を除いた。

3-2-2 淀川に係わる取排水

淀川を水源とする水道事業体の多いことが明らかとなったが、淀川には同時に流域の下水处理場の処理水も放流されている。河川レイヤーにおいて水道と下水道がどのような関わりを持っているか、上水道の取水位置と下水処理水の放流位置を調べ、取排水の関係から淀川の水循環の特性を述べる。

図 3-1 に対象区間の水道の取水口と下水処理水の放流口の位置を示す。同図より、水道事業体は、下水処理場から放流された処理水を含んだ河川水を再び取水していることがわかる。対象区間に限定して、何回の下水処理を受けた水を水道用水として利用しているか、その最大回数を調べよう。

まず、木津川から取水された水は京都府営水道の木津浄水場で取水され府内に供給される。この水は一部が相楽処理場を経て木津川に放流される。その下流部で京田辺市が取水し薪浄水場を経て給水され、利用された水道水は京都府流域下水道の洛南浄化センターへ集められる。ここでの処理水は宇治川へ放流され3川合流地点を流下する。大阪府域に入ると最初に大阪市により取水される。しかし、ここで取水された水は豊野浄水場を経て大阪市内へ給水され、市内の公共下水道で処理された後に市内河川または大阪湾へ放流されることとなる。従って、下水処理水は淀川には還元されない。次に大阪府の磯島取水口で取水された水は村野浄水場を経て府内に送水される。この水は、枚方市も受水している。枚方市は淀川自流の水利権も有するため、単独でも取水を行い中宮浄水場を経て市内に給水している。これらの水は一部が枚方市の北部処理場に集められ、淀川に放流されている。しかし、放流位置の下流には前述の中宮浄水場の取水口があり、この間で水が循環していることになる。また、枚方市で利用された水は一部が大阪府の淀川左岸流域下水道の渚処理場に集められ淀川に放流されている。渚処理場の放流口から下流には寝屋川市をはじめ大阪市・大阪府・阪神水道企業団他の事業体による 11 の取水口がある。

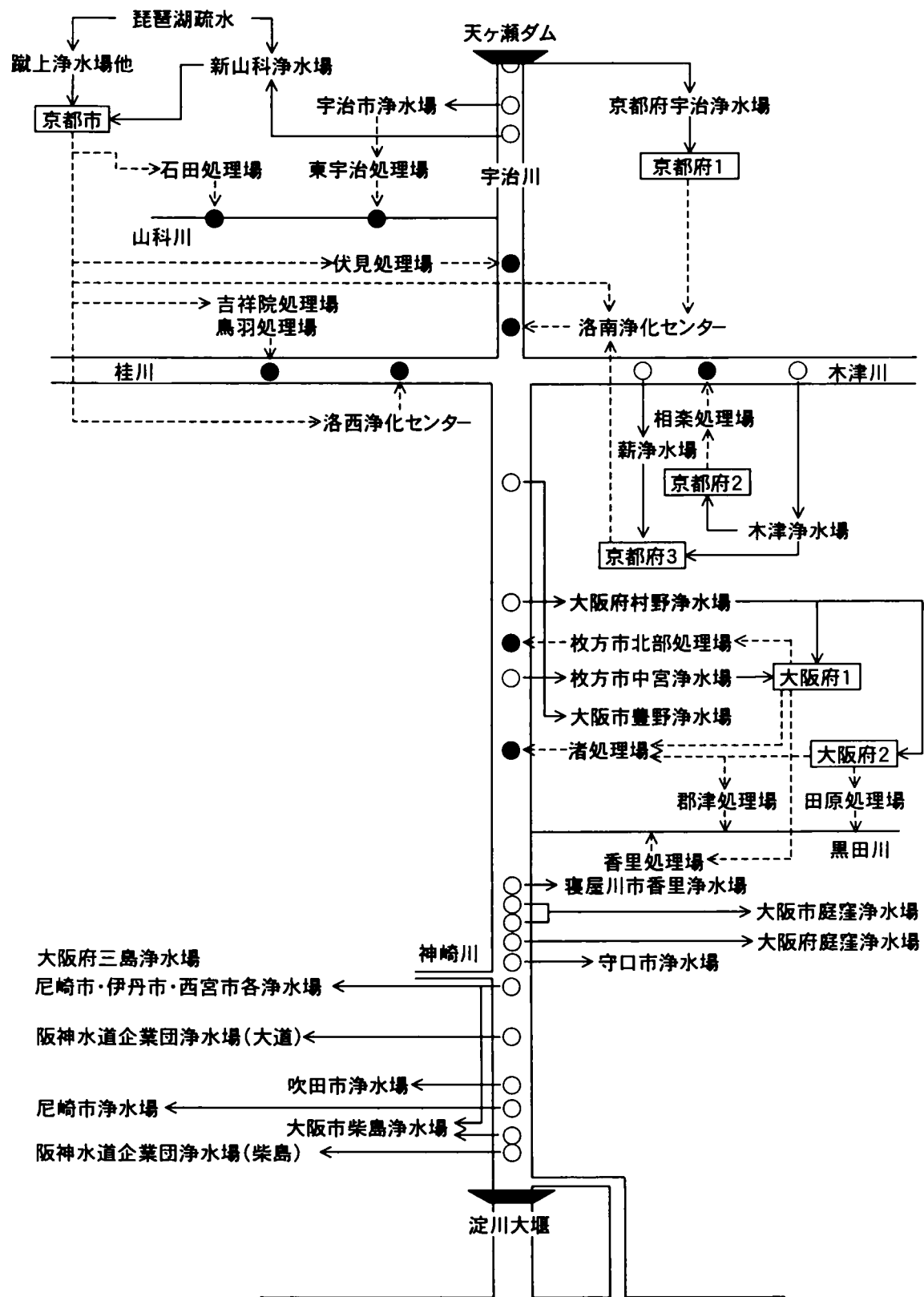


図 3-1 水道取水と下水処理水放流による水循環 (1995) ²⁾

以上より、ここに示した水道事業体は、少なくとも計4回の下水処理を経た水を水道水源として利用している。さらに、これらの水道事業体から供給を受ける都市では水利用の後に少なくとも5回目の下水処理を行い、市内河川または大阪湾に処理水を放流していることになる。

淀川では上記のように上流部で放流された下水処理水が下流部で水道水源として多段的に利用されるカスケード型水利用が行われている。

3-3 都市活動レイヤーにおける水利用実態

震災により浄水施設の被害や導水・送水経路上流での管路被害によって断水が生じた時、その影響は平常時に水利用量が多い地域ほど大きく、都市活動への影響内容も様々である。本節では、この水利用量の分布を調べると共に水利用に関連する要因をもとに震災による断水の影響について考察する。

3-3-1 用水の分類

上水道から供給される用水は、一般に図3-2のように分類される。家庭用水は一般世帯で利用される用水である。都市活動用水は、それ以外の商業施設・事務所・工場・公共施設等で利用される用水であり、業務営業用水・工場用水・その他用水に分けられている。ただし、工業地帯の工場では、原材料、洗浄・ボイラー用水などに工業用水道を利用している場合が多い。本研究では上水道事業による給水のみを対象としているため、これらは含んでいない。その他用水とは工事用の臨時用水や公共施設での有効無収水量である。

本項で整理する用途別有収水量は、前述の一般的な分類を目安に各都市が自市の特色を踏まえて独自の判断基準で家庭用水、業務営業用水、工場用水及びその他用水に分類した結果¹⁾を使用する。そのような分類がなされていない都市については、口径別の有収水量を口径の大きさによって家庭用水と都市活動用水に分類する。

このため、以下では対象地域を構成する市区町村の用途別水利用量を家庭用水と都市活動用水に分けて考察する。

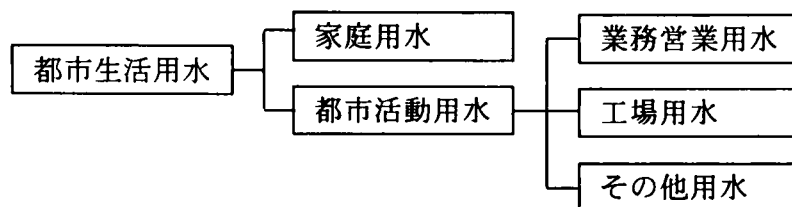


図 3-2 都市生活用水の分類

3-3-2 家庭用水¹⁾³⁾⁴⁾

対象地域における用途別の水利用量を表 3-2 に示す。家庭用水と都市活動用水を加えた全利用水量（有収水量ベース）は、年間 18.4 億 m^3 である（1997）。この内、大阪市が単独で 24%を占めている。この全水利用量の市区町村別の分布を図 3-3 に示す。同図より、大阪市以外では、堺市、東大阪市、豊中市、枚方市等で水量が大きくなっている。

家庭での利用用途は、飲料水・炊事用水・トイレ用水・洗濯用水・風呂用水・洗車用水などであるが、この家庭用水として水を利用するのは都市生活者の中でも主に当該地に常住している住民である。家庭用水の年間利用量は、13.3 億 m^3 であり、全水量の 72.4%に相当している。都市の中では大阪市が 19%を占め最も大きい。各市区町村の家庭水利用量と利用量密度（千 m^3 /年/ km^2 ）の分布を図 3-4、図 3-5 に示す。

同図より、家庭用水の利用量は、大阪市、京都市、神戸市の周辺に位置する堺市、東大阪市、尼崎市、吹田市等でも多くなっている。また利用量の密度では、大阪市城東区、阿倍野区、東成区や京都市中京区など大阪市と京都市の中心部に近い場所で高くなっている。

表 3-2 対象地域における用途別水利用量

単位：百万 m^3 /年

地域		家庭用水	都市活動用水				計
				業務用水	工場用水	その他	
京都府	京都市	149.8	57.1	44.2	12.9	—	206.9
	その他の都市	64.1	13.8	10.4	3.0	0.4	77.9
	計	213.9	71.0	54.6	15.9	0.4	284.9
大阪府	大阪市	252.6	187.5	161.2	24.3	2.0	440.1
	その他の都市	613.0	164.1	124.0	35.2	4.9	777.1
	計	865.6	351.6	285.1	59.6	6.9	1217.2
兵庫県	神戸市	139.7	48.2	48.2	—	—	187.9
	その他の都市	112.5	38.2	23.6	13.8	0.8	150.7
	計	252.2	86.3	71.7	13.8	0.8	338.5
合計		1331.8	508.8	411.4	89.3	8.1	1840.6

注：神戸市の工場用水とその他用水、京都市のその他用水は集計を行っていないため不明である。

これら分布は、図 3-6 と図 3-7 に示す給水人口、給水人口密度とほぼ一致した分布である。次に給水人口をベースとした 1 人 1 日当たりの全利用水量原単位では、京都市 392 リットル、大阪市 464 リットル、神戸市 364 リットルとなっている。これを家庭用水原単位でみると、京都市 284 リットル、大阪市 266 リットル、神戸市 271 リットルと大きな違いはない。全利用水量で、大阪市の原単位が大きいのは都市活動用水の利用量が多いためと思われるがこれについては後述する。この家庭用水原単位の分布を図 3-8 に示す。同図より、家庭用水原単位は、吹田市、京都市東山区、下京区、中京区等で高く、逆に大阪市西成区、神戸市垂水区、大阪市生野区等で少なくなっている。

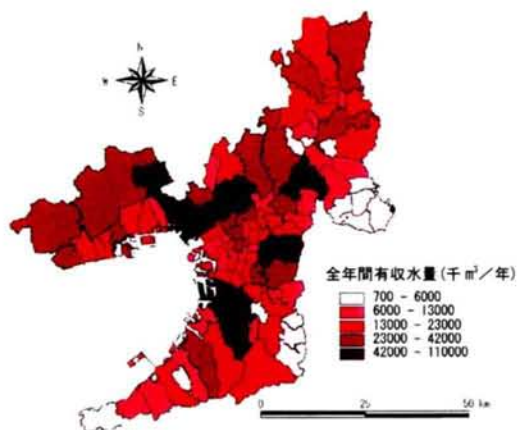


図 3-3 全利用水量の分布

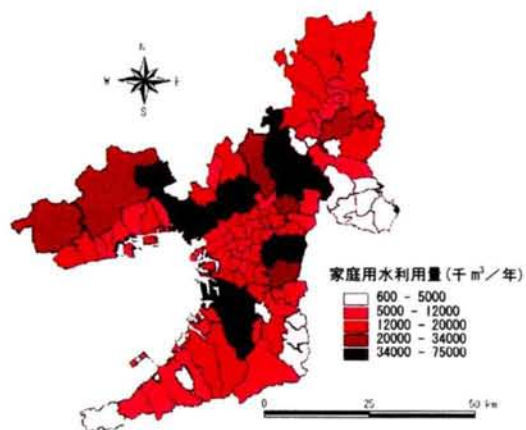


図 3-4 家庭用水利用量の分布

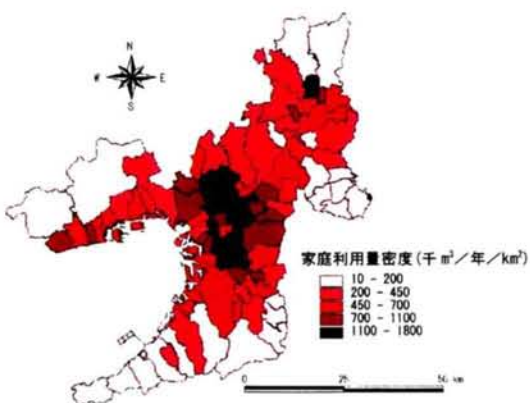


図 3-5 家庭用水利用量密度の分布

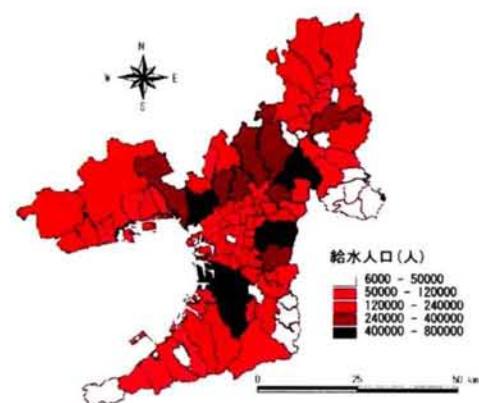


図 3-6 給水人口の分布

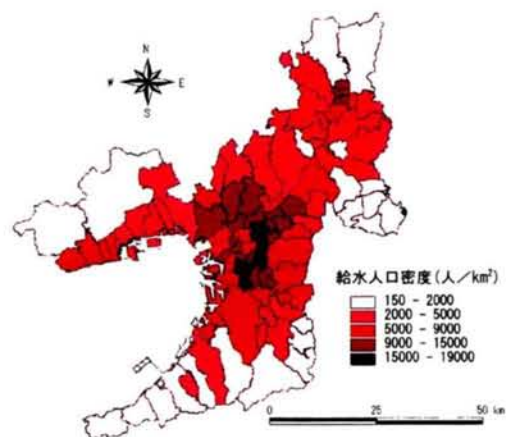


図 3-7 給水人口密度の分布

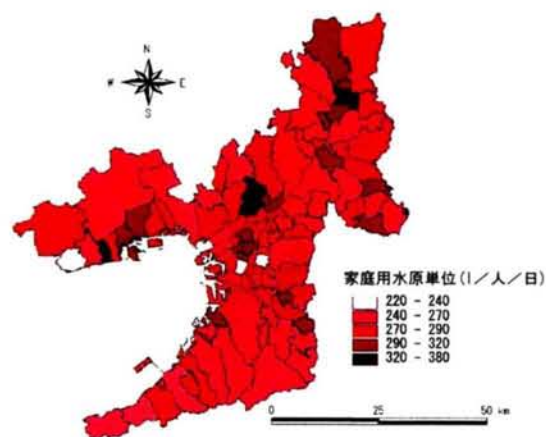


図 3-8 家庭用水原単位の分布

3-3-3 都市活動用水¹⁾³⁾⁴⁾

対象地域の都市活動用水量は、年間 5.1 億 m^3 であり、全利用水量の 27.6% に相当する。利用水量の多いのは大阪市で、年間 1.9 億 m^3 を利用している。これは、全体の 37% に相当し、家庭用水の大阪市への集中度 (19%) の 2 倍にもなっている。京都市も神戸市も 10% 前後であるので大阪市に都市活動用水が集中していることがわかる。次に市区町村別の都市活動用水の利用量を図 3-9 に示す。利用量の多いのは大阪市中心部・北区・堺市・尼崎市の順である。この都市活動用水の分布は、図 3-11 に示す第 3 次産業従業者数の分布とは若干異なる。これら従業者は当該地に居住する常住者と併せて都市生活者であるが、この都市生活者の分布を昼間人口で捉え、図 3-12 に示す。同図は、都市活動用水の分布とほぼ一致していることがわかる。また、大阪市中心部・北区、神戸市中心部、京都市中京区などで都市生活者が集中し、集中地域は明らかに図 3-6 に示した給水人口 (常住地) の分布と異なっている。この昼間と夜間の人口の違いを明確にするために昼夜間人口比率を図 3-13 に示す。同図より、例えば大阪市中心部では常住人口 5.3 万人に対し約 11 倍の 57.7 万人が昼間人口となっている。大阪市全体でみても、常住人口の約 260 万人に対して、昼間人口は約 380 万人となり 120 万人増加している。

水道計画では、地震時の非常用水量の確保基準を常住人口 (給水人口) 1 人当たり 1 日何リットルという形で想定することが多い。しかし、都市活動用水は、当該地に居住していない他都市からの通勤者・通学者、すなわち都市生活者にもとづく利用量を多く含んでいる。都市によっては都市生活者人口が常住人口を大きく上回っており、そのような都市では震災に備えて都市生活者のための用水を考えておく必要がある。

次に都市活動用水を利用量密度として表すと図 3-10 となる。密度の高いのは大阪市中心部、北区、天王寺区、西区等である。この利用量密度は、図 3-14 に示す事業所数密度の分布とほぼ一致している。大阪市中心部と北区は利用水量と発生密度が共に高く、対象地域の中で最も都市活動用水としての利用が活発であると言える。

最後に、各市区町村の家庭用水と都市活動用水の水量比率を図 3-15 に示す。同図より家庭用水の割合の高いのは吹田市、太子町、八幡市、井手町等で、逆に大阪市中心部、北区、天王寺区、西区等では都市活動用水の割合が高くなっている。

3-4 震災時の都市活動影響ポテンシャルに関する考察

3-4-1 水利用実態からみた地域の都市活動影響ポテンシャル

(1) 都市活動影響ポテンシャルに関連する要因の抽出

都市活動影響ポテンシャルとは、震災時に水道システムが機能しなくなることにより顕在化する都市活動への影響の大きさであると定義する。本項では、前節で述べた都市活動レイヤーにおける水利用実態を踏まえ、都市活動影響ポテンシャルの観点から対象地域を考察する。

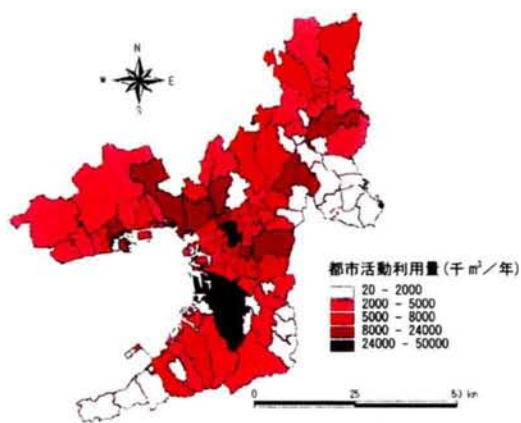


図 3-9 都市活動用水利用量の分布

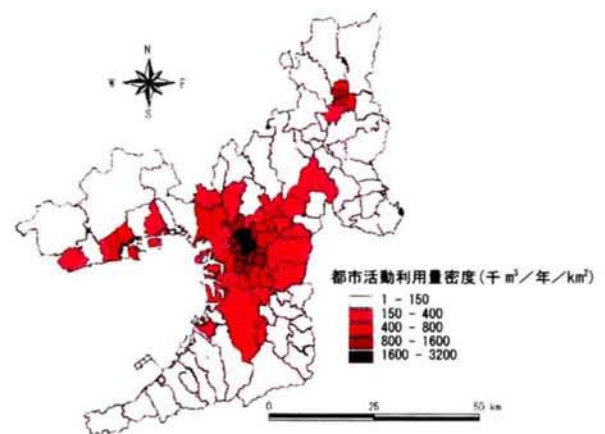


図 3-10 都市活動用水利用量密度の分布

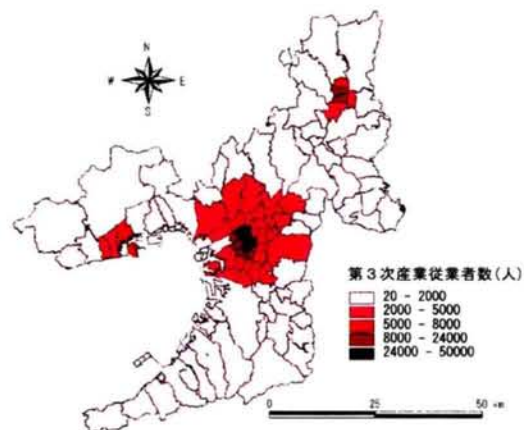


図 3-11 第 3 産業従業者数の分布

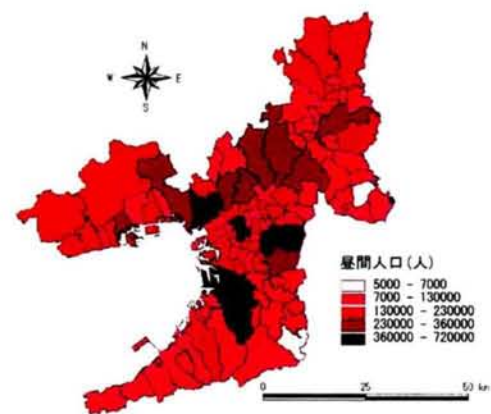


図 3-12 昼間人口の分布

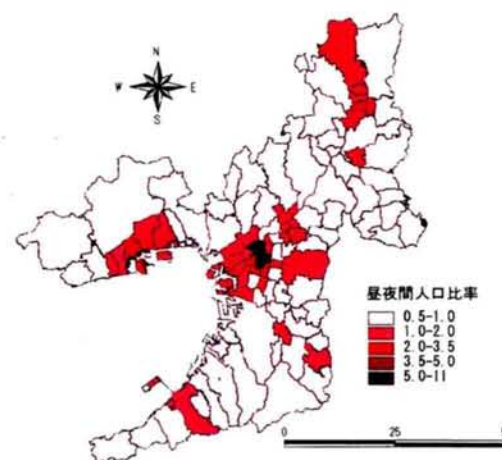


図 3-13 昼夜間人口比率の分布

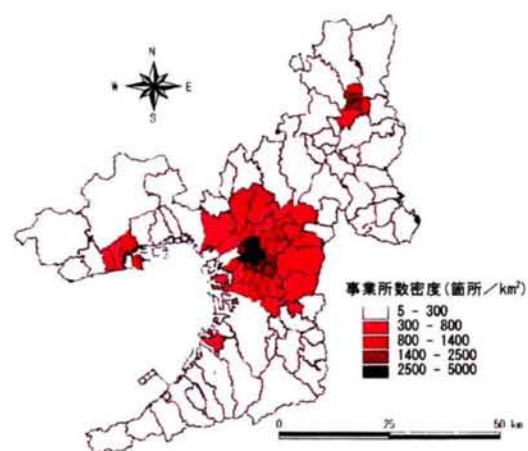


図 3-14 事業所数密度の分布

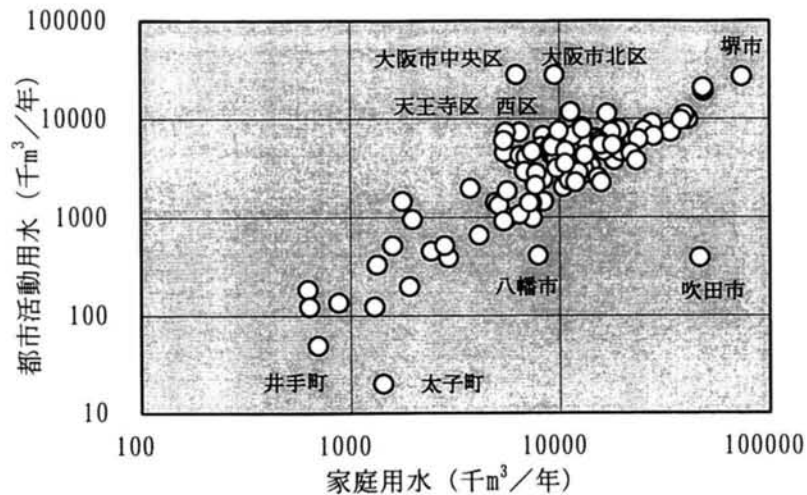


図 3-15 家庭用水と都市活動用水

都市活動影響ポテンシャル（以下では、都市活動影響ポテンシャルを単に影響ポテンシャルと略記する）を考察する要因は、「利用水量」自体と「利用水量に影響する要因」に分けられる。前者は断水した水量の大きさによって影響ポテンシャルを測るものであり、後者は断水することによって都市活動に及ぼす影響を具体的な要因によって表し影響ポテンシャルを測ろうとするものである。

利用水量に関係する要因は、家庭用水と都市活動用水に分けられる。各市区町村の利用水量の規模を表す水量そのもの、都市生活者当たりの利用量の多さを表す原単位、単位面積当たりの利用水量の集中度を表す利用量密度を考える。

家庭用水への影響要因として給水人口を、都市活動用水への影響要因として昼間人口、産業従業者数、事業所数、さらにそれらの内訳として、第3次産業従業者数と第2次産業従業者数を選定した。これらについても、規模を表す要因と集中度を表す要因を設定する。

以上より、影響ポテンシャルに関連する要因を表 3-3 のとおり抽出した。

(2) 主成分分析による総合的な地域分類

1) 主成分分析法⁵⁾⁶⁾

本研究では、多変量解析手法の1つである主成分分析 (Principal Component Analysis) を適用して影響ポテンシャルに関係する要因を用いた総合的な地域分析を行う。以下に、主成分分析法について説明する。

主成分分析は、互いに相関のある p 個の特性値の持つ情報を互いに無相関な m 個 ($m < p$) の総合特性値に要約するものである。この総合特性値 Z_k は、特性値 p の重み付き平均として次式で表される。

$$Z_k = l_{k1}x_1 + l_{k2}x_2 + \cdots + l_{kp}x_p = \sum_{i=1}^p l_{ki}x_i \quad (3.1)$$

ただし、 k は 1 から m までの総合特性値を表す。

ここで、互いに無相関な m 個の総合特性値を抽出するために次の条件が必要である。

$$l_{k1}^2 + l_{k2}^2 + \cdots + l_{kp}^2 = \sum_{i=1}^p l_{ki}^2 = 1 \quad (3.2)$$

第1主成分 Z_1 の係数 l_{1i} ($i=1 \sim p$) は、式 (3.2) の条件のもとで Z_1 の分散が最大になるよう定める。第2主成分 Z_2 の係数 l_{2i} は、同式を満足し、かつ Z_2 が Z_1 と無相関になるという条件のもとで、 Z_2 の分散が最大になるよう定める。以下、同様にして、第 k 主成分の係数 l_{ki} は、式 (3.2) を満足し、かつ Z_k が $Z_1, Z_2 \sim Z_{k-1}$ と無相関になるという条件のもとで、 Z_k の分散が最大になるよう定める。この分散を最大にすることは、主成分の軸上で総合特性値によるサンプルの識別をできるだけ容易にすることを意味している。

上記の条件で分散を最大化することは、ラグランジェの未定乗数法を用いることにより線形連立方程式として定式化され、式 (3.3) に表す特性値 x_i の分散・共分散行列 V の固有値問題となる。 I は単位行列であり、 λ は V の固有値である。

$$|V - \lambda I| = 0 \quad (3.3)$$

この λ は主成分の分散に相当するため、重み l_{ki} は、 V の固有値 λ の大きい方から順に m 個とり、対応する固有ベクトルを当てはめればよい。

では、主成分は幾つまで絞り込めば良いか、その目安になるのが寄与率である。いま、簡単のために特性値が2つの場合を考えよう。サンプル数が n 個の場合、直交座標系 (x_1, x_2) 、 (Z_1, Z_2) における n 点の重心からの距離の2乗和は、両座標系を用いると次式となる。

$$\sum_{a=1}^n (x_{a1} - x_{1m})^2 + \sum_{a=1}^n (x_{a2} - x_{2m})^2 = \sum_{a=1}^n (Z_{a1} - Z_{1m})^2 + \sum_{a=1}^n (Z_{a2} - Z_{2m})^2 \quad (3.4)$$

この右辺の2項が仮に全分散に対して80%と20%という説明力の大きさを示したとすると、第1項だけで2つの特性値の持つばらつきの80%を説明できたことになり、2つの特性値を第1項の主成分 Z_1 だけで代表させることができる。このように、全分散に対する、主成分の分散の大きさを寄与率という。そして、 p 個の特性値を寄与率の大きな方から m 個の主成分に要約したとき、 m 個の主成分の寄与率の合計を累積寄与率という。この累積寄与率が総合特性値の説明力を表し絞り込みの目安となる。

次に要約した主成分軸の意味を解釈するために、因子負荷量 (factor loading) がある。これは、主成分 Z_k と特性値 x_i との相関であり次式で定義される。

$$r(Z_k, x_i) = \text{Cov}(Z_k, x_i) / \sqrt{V(Z_k) \cdot V(x_i)} \quad (3.5)$$

ここに、 $V(Z_k)$ と $V(x_i)$ は Z_k と x_i の分散を、 $\text{Cov}(Z_k, x_i)$ は共分散である。この因子負荷量により主成分の意味付けを行う。

意味付けを行った軸に対して、係数 l_{ki} を用いて総合特性値である主成分値を求めるが、これを主成分得点 (principal component score) という。

2) 総合的な地域分析

102 の市区町村に対して影響ポテンシャルの観点から総合的な考察を行うために表 3-3 に示す要因により主成分分析を行う（神戸市は用途別水利用量データを作成していないため分析から除いている）。

表 3-3 震災時の都市活動影響ポテンシャルに関連する要因^{1)7)~10)}

	用途	影響する対象	要因
利用 水 量	家庭用水	一般世帯	1 家庭用水利用量 (千 m ³ /年)
			2 家庭用水利用量密度 (千 m ³ /年/km ²)
	都市活動用水	業務営業事務所等	3 都市活動用水量 (千 m ³ /年)
			4 都市活動用水利用量密度 (千 m ³ /年/km ²)
			5 業務用水利用量 (千 m ³ /年)
			6 業務用水利用量密度 (千 m ³ /年/km ²)
		工場	7 工場用水利用量 (千 m ³ /年)
			8 工場用水利用量密度 (千 m ³ /年/km ²)
影 響 要 因	家庭用水	主に常住者	9 給水人口密度 (人/km ²)
			10 昼夜間人口比率 (%)
	都市活動用水	主に従業者	11 産業従業者数密度 (人/km ²)
			12 事業所数密度 (箇所/km ²)
			13 住宅密度 (戸/km ²)
			14 第3次産業従業者比率 (%)
			15 第2次産業従業者比率 (%)
			16 第1次産業従業者比率 (%)

注1：データは原則として1996年度のデータを使用し、隔年の統計調査は近い年のデータを使用した。

注2：住宅データは山間地の1部町村で調査が行われていないため、全市町村の最低値を与えた。

分析の結果、第1軸は寄与率48%、第2軸は18%となり、第3軸以下は13%以下の低い値となった。第1軸と第2軸の因子負荷量を図3-16に示す。同図より、第1軸は、事業所数密度、都市活動用水利用量密度、業務用水利用量密度、業務用水利用量などが正で大きく、第2次産業従業者数比率や第1次産業従業者数比率が負の値となっている。第2軸は、家庭用水利用量とその密度、給水人口密度、工場用水利用量とその密度で正の値が大きくなっている。

以上より、第1軸は「第3次産業を中心とした都市活動の集積度」を表し、第2軸は「家庭・工場系の水利用の活性度」を表すと解釈する。また、2軸の累積寄与率は66%であり説明力があると判断する。この結果は、対象地域内の市区町村が大きくは、第3次産業を中心とする市区町村と、家庭用水や工場用水を多く利用する市区町村に分けられることを意味している。

主成分得点を図3-17に示す。同図より、影響ポテンシャルの大きい市区町村は、都市活動の集積度が高くかつ水利用の活性度も高い第1象限に表れる。この象限には、大阪市生野区、東成区、尼崎市、東大阪市、城東区などが含まれている。これらの市区では、震災により、家庭用水や工場用水への影響と共に都市活動への影響も大きい。また、第4象限の大阪市中心部、北区、西区、天王寺区などは、第3次産業を中心とした都市活動への影響が大きく現れる区域である。

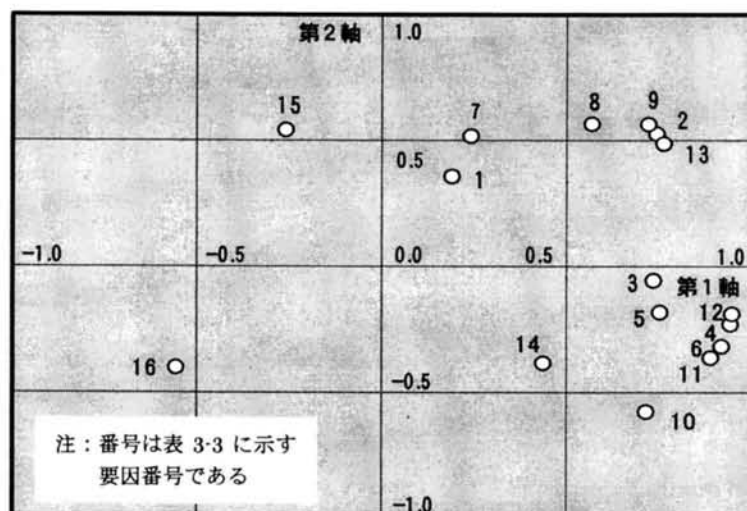


図 3-16 因子負荷量の分布 (第 1 軸と第 2 軸)

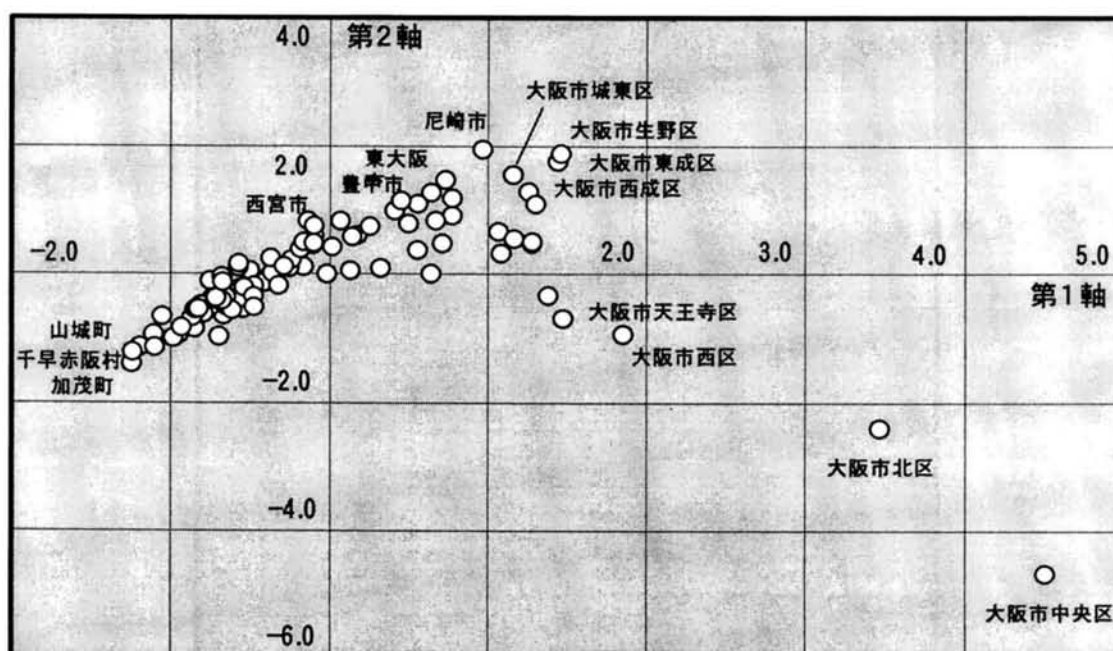


図 3-17 市区町村の主成分得点の分布

一方、第3象限は水利用の活性度と都市活動の集積度が共に低く、影響ポテンシャルも低いと考えられる都市である。加茂町、千早赤阪村、山城町などがこのグループに含まれている。

3-4-2 震災被害に関わる都市環境要因¹¹⁾

水循環システムが機能しなくなることにより都市生活に上述のような影響が生じるが、水循環ネットワークとは直接関係しない都市環境の要因によっても震災の被害は助長され軽減される。要因とは、延焼の原因となる住宅の密集度合いや消防水利の有無等である。

阪神・淡路大震災では、直後の断水により消火栓が使用できなくなり大規模な延焼を生じている。特に木造家屋の密集した地区では甚大な被害を生じた¹²⁾。この消防水利については消防法に基づいて消防庁が設置基準として「消火栓（公・私）、防火水槽、プール、河川・溝等、濠・池等、海、湖、井戸、下水道」を挙げている。消防水利の給水能力としては、常時貯水量が 40m³ 以上または取水可能量が 1m³/分以上かつ連続 40 分以上の能力を有するものでなければならず、また、配置に関しては、用途地域と年間平均風速によって基準が定められている¹³⁾。対象地域におけるこれら消防水利の現状を表 3-4 に示す。

表 3-4 消防水利の現状¹⁴⁾

	公設消火栓		防火水槽		その他		計
	箇所数	(%)	箇所数	(%)	箇所数	(%)	箇所数
京都市	20,587	87.3	2,067	8.8	931	4.0	23,585
京都府	9,695	55.9	7,646	44.1	0	0	17,341
大阪市	30,992	93.8	1,322	4.0	724	2.2	33,038
大阪府	62,586	83.4	7,835	10.4	4,603	6.1	75,024
神戸市	23,595	91.6	1,278	5.0	892	3.5	25,765
兵庫県	46,621	77.3	10,424	17.3	3,271	5.4	60,316
計	194,076	82.6	30,572	13.0	10,421	4.4	235,069

注：公設消火栓とは、上水道または工業用水道へ接続されている消火栓である。

同表より京都市・大阪市・神戸市の都市部で公設消火栓の割合が高く水道システムへの依存度の高いことがわかる。消火栓への依存度は全国平均で 73.9% であり、都市部の公設消火栓への依存度が非常に高いことがわかる。

水道システムが機能しなくなり消火栓が使用不可能となったとき、消防水利の条件を満足しなくとも、消火のための水源がどれだけ存在するかは重要である。実際、阪神・淡路大震災では、小河川を堰止めて、そこから消防水利の取水を行っている¹⁵⁾。そこで、市区町村単位で国土地理院の地形図（1/2500）から行政区域内の河川・池等の平水時の水面積を GIS を援用して調べた。地形図に掲載されている水面積であるため概略の内容であるが市区町村単位での水面積の多寡については考察が可能であると考えたためである。

市区町村毎の水面積を図 3-18 に示す。同図より大阪市天王寺区や阿倍野区、東成区など一部で極端に水面積の少ない区域が存在していることがわかる。また、水面積率（ha/km²）を図 3-19 に示す。水面積率の低いのは、大阪市天王寺区、京都市左京区、神戸市中央区などである。表 3-4 に示すよう特に大阪市、神戸市、京都市では防火水槽の設置率が低いため、水道システムが機能しなくなった時に消防水利を確保する手だてが存在せず危険である。これら都市の中で、前述の水面積率も低い、大阪市天王寺区、京都市左京区、神戸市中央区などは代替水源も存在しないことを意味しており、極めて危険な地域であると言える。しかしながら、京都市上京区の調査研究¹⁶⁾では、複雑な形態の袋小路が多数存在するため、消火栓があっても奥まで消防ホースが届きにくい袋小路が多い。この

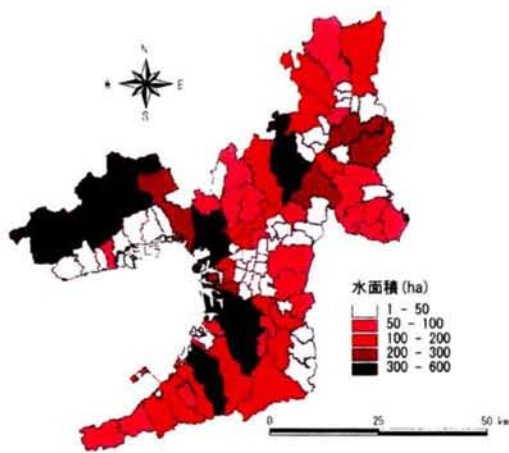


図 3-18 水辺面積の分布

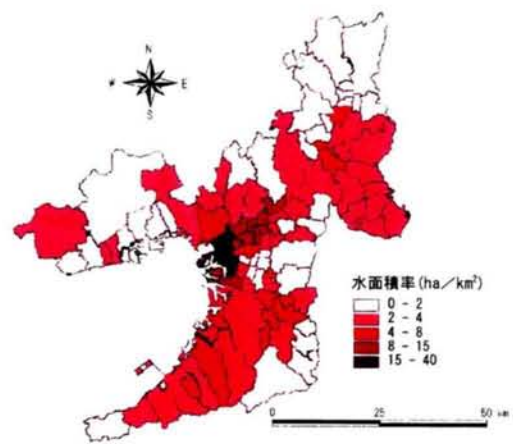


図 3-19 水面積率の分布

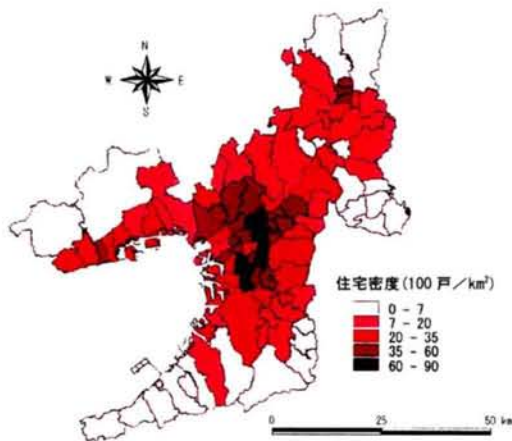


図 3-20 住宅密度の分布

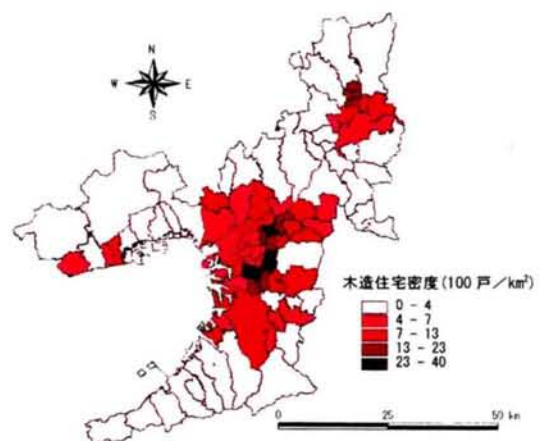


図 3-21 木造住宅密度の分布

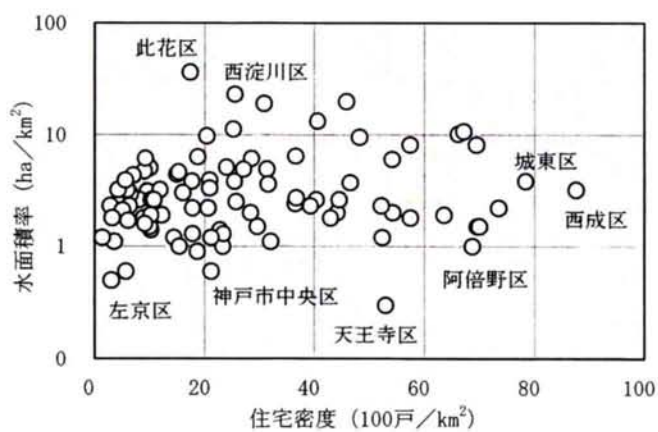


図 3-22 住宅密度と水面積率

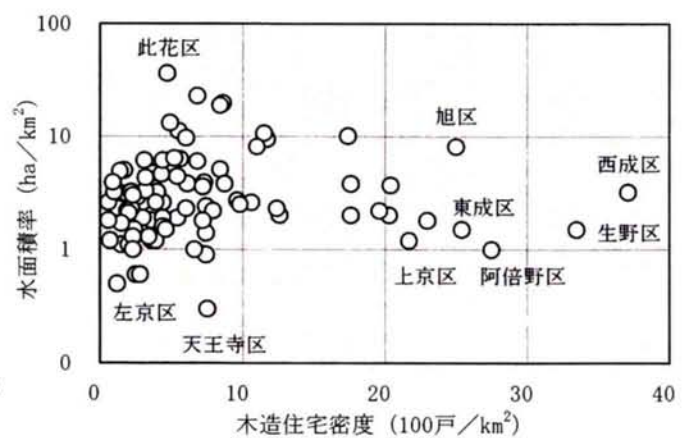


図 3-23 木造住宅密度と水面積率

ような場合には、消火栓が多いからといって、そのことが消防水利の確保につながらないことを指摘しておこう。

一方、震災時に出火した際、住宅密度の高い地域（図 3-20 参照）では延焼の可能性が高い。特に耐震性が弱くかつ延焼を引き起こしやすい木造住宅（防火木造でない木造住宅）の分布は消防用水を確保する必要性の面から重要である。この木造住宅の密度（100 戸/km²）を図 3-21 に示す。同図より、大阪市では、西成区（37.1）、生野区（33.5）で高く、京都市では、上京区（21.7）、中京区（20.3）で高くなっている。これらの区域は震災時の火災という観点から危険な地域である。

上述の水面積率と住宅密度、木造住宅密度の関係を図 3-22 と図 3-23 に示す。同図より対象地域には木造住宅密度が高くかつ水面積率の低い区域が多く存在していることがわかる。大阪市天王寺区、阿倍野区、生野区、西成区、京都市上京区などである。これらの都市では、水道システムの強化による消火栓や防火水槽に依存した水確保が重要である。しかし、消火栓については水道システムが機能しなくなる可能性がある。防火水槽などの貯留施設を整備することは重要であるが都市域ではその場所の確保も限られている。このような場合に備えて、都市域に存在し有効利用されていない下水道を利用することが考えられる。具体的には、下水処理水（高度処理水）を利用した貯留施設の整備が代替案として有効であろう。特に都市生活者の集積度が高い都市部では、下水処理水を水路により流下させ、平常時における都市生活者のアメニティ向上を図る環境創成に活用し、震災時には貯留された処理水を消防水利等として利用することが考えられる。

3-5 結言

本章では、淀川大都市域の水道事業体が淀川に依存している実態を明らかとした後、取水された水道水の水利用実態を市区町村単位で把握した。この結果を基に震災想定時の都市活動影響ポテンシャルを総合的な観点から考察した。さらに、水道とは直接関係しない水面積や木造住宅密度など震災時に重要となる都市環境要因の観点からも地域を考察した。分析により明らかとなった事項を以下に示す。

(1) 淀川大都市域の水道事業体は、水源の 90% を淀川に依存している。特に京都市・京都府・大阪市・大阪府・神戸市及び阪神水道企業団だけで 85% となる。これら 6 つの水道事業体は、対象地域における水道システムの要となっている。

(2) 水道事業体にとって貴重な水源となっている淀川は、水道取水だけでなく下水処理水の放流先にもなっている。対象区間では、河川からの水道取水→都市生活者による水利用→下水処理場での処理と河川への放流、が多段的に行われるカスケード型水利用が行われている。下流部の水道事業体は、少なくとも 4 回の下水処理を行った処理水を含む水を水道水源として利用している。

(3) 家庭用水は、京都市・大阪市・神戸市の周辺域でも利用水量が多くなっている。一方、

都市活動用水は、大阪市中心部・北区、神戸市中心部など限られた都市部で水利用密度が高くなっている。家庭用水利用量が主に給水人口の分布から説明できるのに対して、都市活動用水利用量は昼間人口と利用量密度は事業所密度と相関が高い。震災時には、昼間人口として把握することのできる都市生活者が影響を受けることとなる。

(4) 対象地域の都市活動影響ポテンシャルを主成分分析手法により分析した。その結果、総合軸として「第3次産業を中心とした都市活動の集積度」と「家庭・工場系の水利用の活性度」を定義した。両軸より都市活動影響ポテンシャルの大きい区域は、大阪市生野区、東成区、尼崎市、東大阪市など、第3次産業を中心とした都市活動への影響が大きいのは大阪市中心部、北区などであった。反対に、共に低いレベルである、加茂町、千早赤阪村、山城町などでは都市活動影響ポテンシャルは小さいと判断した。

(5) 震災を想定した対策として、給水人口ベースの確保水量を目標に掲げている水道事業者が多いが、都市生活者が集中する大都市域の中核都市部では、集中した都市生活者に対する震災時の水確保について考慮する必要があることを指摘した。

(6) 淀川大都市域では、京都市・大阪市・神戸市という中核都市部で特に、防火水槽の数が少なく公設消火栓への依存度が高い。水道システムへの依存度が高いことを意味しているが、震災時に水道が断水した場合、これらの都市では火災により甚大な被害を受ける可能性がある。

(7) このような都市では、都市内の河川・池などが消防水利として重要であるが、水面積が少ないだけでなく、延焼の危険性の高い木造住宅密集地が多く存在する（大阪市天王寺区・阿倍野区・生野区・西成区・京都市上京区等）。これらの地域では、都市生活者が集中している特性を活かして下水処理水を利用するなど水道システム以外の水利を確保することが重要であることを指摘した。

(8) 従来の下水道システムは、規模の経済性から流末に処理場が設置されているため、特に大阪湾に接する処理場の水は利用できない。このような点からも震災時を考慮した場合、従来の下水道システムを見直す必要があることを指摘しておこう。

【参考文献】

- 1) (社)日本水道協会：水道統計（施設・業務編），1997.
- 2) 塩路勝久・清水康生：河川水中の下水処理水割合を指標としたカスケード型広域循環利用に関する考察～淀川流域を対象として～，下水道協会誌，Vol.34，No.409，pp.63-72，1997.
- 3) 清水康生・萩原良巳・岩根知里：ライフスタイル概念に基づく水利用構造分析に関する考察，環境システム研究，Vol.27，pp.81-88，1999.
- 4) 清水康生・萩原良巳・西澤常彦：都市域における渇水時の水利用構造評価モデルに関する研究，京都大学防災研究所水資源研究センター研究報告第20号，pp.69-80，2000.
- 5) (株)日本水道コンサルタント：水需要予測の理論と実際，NSC 研究年報 Vol.6，No.1，

pp.96-104, 1978.

- 6) 田中豊・脇本和昌：多変量統計解析法，現代数学社，1983.
- 7) 兵庫県健康福祉部生活衛生課：水道施設現況調書，1997. 他
- 8) 総務庁統計局：平成 7 年国勢調査，編集・解説シリーズ No.7，通勤・通学人口及び昼間人口，1998.
- 9) 総務庁統計局：平成 10 年住宅・土地統計調査報告，2000.
- 10) 総務庁統計局：平成 8 年事業所・企業統計調査報告，第 2 巻事業所に関する集計・都道府県編，1998.
- 11) 清水康生・萩原良巳：震災時を想定した大都市域水循環システムの再構成のための地域分析，日本地域学会年次大会，pp.163-170，2001.
- 12) (社) 日本建築学会編集：阪神・淡路大震災調査報告・建築編 4，木造建築物・建築基礎構造，p5 他，1998.
- 13) 消防庁消防課：消防力・消防水利の基準解説，1984.
- 14) 関西水道事業研究会：消火用水確保の観点から見た都市の安全性と水道のあり方に関する一考察（水道と消火用水分科会報告書），1997.
- 15) 神戸市消防局編：阪神・淡路大震災における消防活動の記録，1995.
- 16) 亀田寛之・萩原良巳・清水康生：京都市上京区における災害弱地域と高齢者の生活行動に関する研究，環境システム研究，Vol.28，pp.141-149，2000.

第4章 震災が水循環ネットワークへ及ぼす影響に関する分析

4-1 緒言

本章では、活断層系による震災によって、淀川大都市域の水循環ネットワーク（河川・水道・下水道）が直接的に受ける影響について分析する。また、第3章の分析を踏まえて都市活動影響ポテンシャルの高い都市への震災の影響について分析する。

震災の特性は、広域性にある。しかし、行政が行っている震度推定は自行政区に限定されるため、これらを利用することができない。このため、本章では、まず広域を対象とした地震動の推定方法について述べる。同方法により、対象地域に関わる活断層系の中から水循環ネットワークに影響すると考えられる活断層系を選定する。本研究では、選定した活断層系の推定震度分布を求め、これらを震災ハザードと定義する。

次に、震災ハザードを対象地域内の水循環ネットワークを構成する施設、すなわち、取水施設・導水管・浄水場・送水管・下水処理場・污水管渠・河川等と重ね合わせる。ハザードと重なった施設を具体的に明らかとし、これら施設が機能を停止すると仮定することにより、震災ハザードの水循環ネットワークへの影響を分析する。

さらに、震災ハザードを淀川大都市域の水利用量の分布と重ね、都市活動影響ポテンシャルの高い都市がハザードと重なるか否かについて考察し、都市活動への直接的な影響について考察する。

4-2 水循環システムに影響を及ぼす活断層系の抽出

阪神・淡路大震災の後、多くの自治体では防災計画の見直しを行っている。この際、地震動の推定を行っているが、各自治体では自行政区内に限定した防災計画の作成を行っているため、震度の推定範囲は限定されている。さらに、推定方法も自治体により異なっているため精度も同じではない。このような理由から府県市の行った既存の調査結果をそのまま利用することはできない。震災による大都市域水循環システムへの影響を考察するためには水源から供給区域までの広域を対象とした地震動の推定を行う必要があり、これら推定結果に基づく防災・減災計画を考える必要がある。このため、本研究では大阪ガスの供給区域と上水道の給水区域がほぼ一致することを利用し、ガス供給区域の既存の地盤データを利用した推定を行うものとする。

4-2-1 活断層による地震動の推定方法と対象地域に関係する活断層系の抽出¹⁾

地震動を推定する基本的な考え方は以下のとおりである。

①対象地域が広域であるため、地震動の推定方法は、推定精度が荒くとも広域的な影響を把握できる方法とする。

②本研究は流域レベルで水循環を捉えるため、個別施設の耐震化の状況は考慮せず、地震動の強さと施設の機能維持の可否との関係に仮定を設けることにより、水循環ネットワークへの影響について考察を行う。

③最大地震動の分布を求めるものとし、地震動の出力は気象庁の震度階とする。

以上より活断層系による地震動の推定方法を図 4-1 に示す。

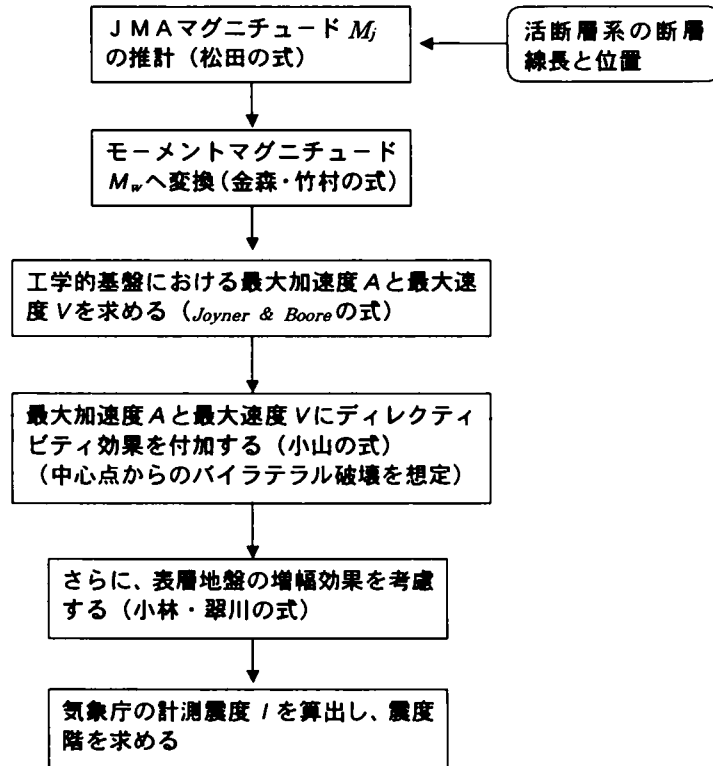


図 4-1 震度推定プロセス

震度推定の手順について同図に沿って説明する。まず、想定地震の起震断層の長さ L (km) を、次式で示す松田²⁾の式に入力することにより気象庁の JMA マグニチュード M_j を求める。

$$M_j = (\log L + 2.9) / 0.6 \quad (4.1)$$

次に、 JMA マグニチュードを金森³⁾・武村⁴⁾の式から求められる次式によりモーメントマグニチュード M_w に変換する。

$$M_w = 0.78 M_j + 1.08 \quad (4.2)$$

求められたモーメントマグニチュードから工学的解放基盤における最大加速度と最大速度を算定する。算定式は Joyner & Boore⁵⁾の次に示す距離減衰式を用いる。

最大加速度 $A(g)$:

$$\log A = -1.02 + 0.249 M_w - \log r - 0.00255 r \quad r = (d^2 + 7.3^2)^{1/2} \quad (4.3)$$

最大速度 $V(kine)$:

$$\log V = -0.67 + 0.489 M_w - \log r - 0.00256 r \quad r = (d^2 + 4^2)^{1/2} \quad (4.4)$$

なお、 d は断層線と震度推定位置の最短距離 (km)である。

この最大加速度 A と最大速度 V にディレクティビティ効果を付加する。ディレクティビティ効果とは、活断層による断層破壊が高速で伝播するために、地震波の振幅が方位によって異なることである。同効果は、小山⁶⁾の式を参考に式(4.5)で求まる Dbi を最大加速度 A と最大速度 V に乗じることで付加する。

$$Dbi = \frac{\sqrt{\left(\frac{c}{V_r}\right)^2 - \cos^2\left(\frac{\pi}{2}\right)}}{\sqrt{\left(\frac{c}{V_r}\right)^2 - \cos^2\theta}} \quad (4.5)$$

Dbi : 断層線中心点からバイラテラル破壊する時のディレクティビティ効果係数

c/V_r : 断層周辺の岩盤 S 波速度と断層破壊速度の比($Geller^7$)が求めた平均値 1/0.72 を使用)

θ : 断層中心点から見た各地点の方向角(時計回りが正)

バイラテラル破壊とは、断層の中央から両側に破壊が進む破壊形態である。更に、表層地盤の増幅効果を考慮する。これは式(4.6)で示す小林・翠川⁸⁾の式を用いて求めた $Aamp$ 、 $Vamp$ を最大加速度 A と最大速度 V に乗じることで考慮することができる。

$$Aamp = \left(\frac{V_{sa}}{V_{sb}}\right)^{-0.374} \quad Vamp = \left(\frac{V_{sv}}{V_{sb}}\right)^{-0.6} \quad (4.6)$$

V_{sa} : 支持基盤以浅の表層地盤内の平均 S 波速度

V_{sb} : 支持基盤内の平均 S 波速度

V_{sv} : 表層地盤内 (GL-30m) の平均 S 波速度

次に、この最大加速度を元に、次式で示す気象庁⁹⁾による加速度～震度変換式を用いて計測震度 I を算出する。最後に計測震度より気象庁の震度階を得る。

$$I = 2 \log A + 0.94 \quad (4.7)$$

本研究で対象とする活断層系は、各府県市が行った「地震被害想定調査」で対象としている活断層系及び「新編日本の活断層」(活断層研究会編：1991)に示されている活断層の確実度・活動度を参考とし、対象地域の水循環ネットワーク(河川・水道・下水道の各主要施設)に影響を及ぼすと推察される次の11の活断層系を抽出した¹⁰⁾¹¹⁾。

- | | | | |
|--------|------------|-----------|--------|
| ①花折断層系 | ④有馬高槻断層系 | ⑦上町断層系 | ⑩比叡断層系 |
| ②黄檗断層系 | ⑤奈良盆地東縁断層系 | ⑧中央構造線断層系 | ⑪金剛断層系 |
| ③西山断層系 | ⑥生駒断層系 | ⑨六甲断層系 | |

4-2-2 震度推定と水循環システムへ影響を及ぼす活断層系の選定¹⁾

活断層系による地震の震度推定に際しては、以下の仮定を設ける。

- ①一つの活断層系に対して一本の断層線を設定する。
- ②大阪ガスの供給区域は、上水道の給水区域とほぼ一致する。このため推定は、既存の地盤データを利用できる大阪ガス供給区域について行う。
- ③推定結果は、対象地域を 300×400mのメッシュで分割した中心点の緯度・経度の位置情報として出力する（対象地域内の全メッシュ数は 13,798）。

震度分布と水循環施設を GIS を援用して地図上で重ね併せ、水循環システムへの影響の大きい活断層系を選定する。ここで対象とする水循環施設は、取水から 102 の市区町村に水が供給され使用後に下水処理場で処理され河川に放流されるまでの以下の施設とする。

水道施設：取水施設、導水管、浄水場、送水管、主要配水管（大阪市内等）

下水道施設：下水処理場、幹線下水管渠

また、阪神・淡路大震災で震度 7 の区域で多くの施設が被災した¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾。このため、水循環施設が機能を維持できないレベルとして震度 7 を仮定し、同震度の震度分布を水循環システムにとっての震災ハザードと考えるものとする。

以上より、水循環システムに影響を及ぼす活断層系として次の 6 活断層系が重要であることが明らかとなった。

- | | | |
|--------|----------|--------|
| ①花折断層系 | ③有馬高槻断層系 | ⑤上町断層系 |
| ②西山断層系 | ④生駒断層系 | ⑥六甲断層系 |

4-3 水循環ネットワークへの影響

本研究では、活断層系による地震は同時に発生しないと仮定する。以下に花折、西山、有馬高槻、生駒、上町及び六甲の 6 活断層系による震災が対象地域の水循環ネットワークへ及ぼす影響について考察する。

4-3-1 震災ハザードと水循環ネットワーク¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁷⁾

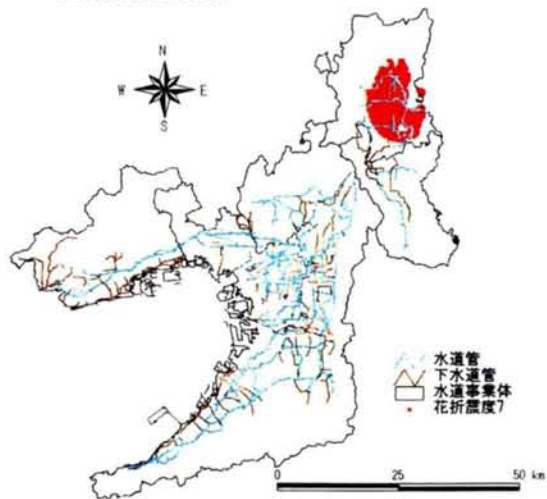
震災ハザードと水循環ネットワークを GIS の援用により重ね合わせ、震災の影響を受ける施設を明らかにする。震災ハザードと水循環ネットワークを重ねて表示した結果を図 4-2 に示す。また、同図より影響を受ける施設の一覧を表 4-1 に示す。以下に各活断層系の震災の影響について説明する。

① 花折断層系

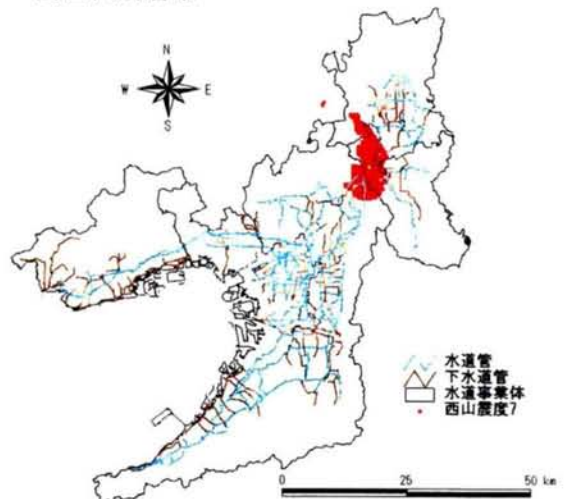
震度 7 が想定されるのは京都市の中心部である。京都市水道の 4 つある浄水場すべてが震災ハザード内に位置しているので、浄水場・送水管の双方が影響を受ける。さらに、琵琶湖疏水も区域に含まれており水源が被災する。このように花折断層系の地震により、京都市における水道ネットワークは壊滅的な影響を受けることが予想される。

また、京都市内で最大規模の下水処理場である鳥羽処理場が被災する。吉祥院処理場と共に被災により淀川本川に未処理汚水が流出した場合には、下流部の水道取水に深刻な影

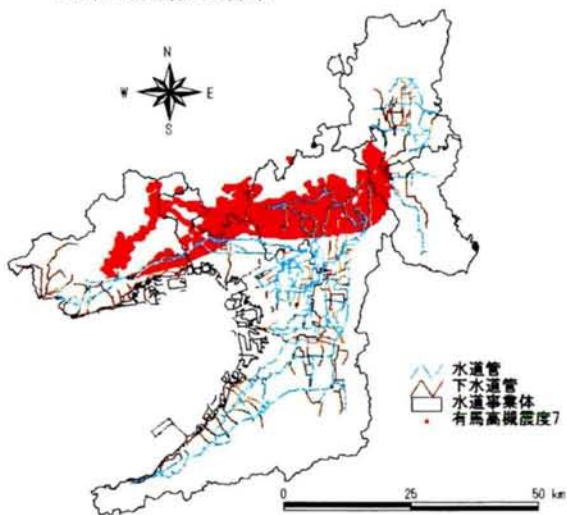
(1)花折断層系



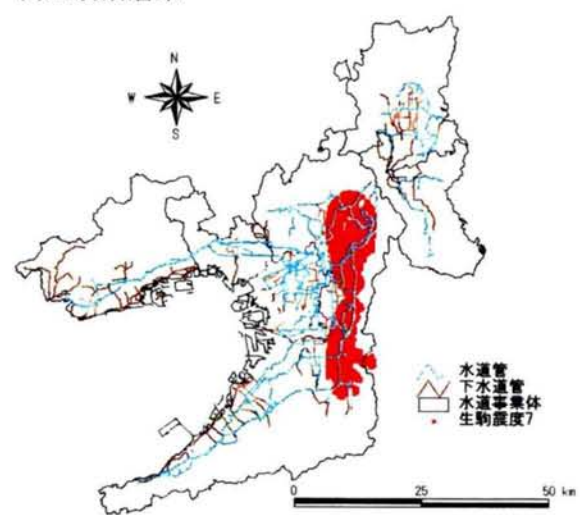
(2)西山断層系



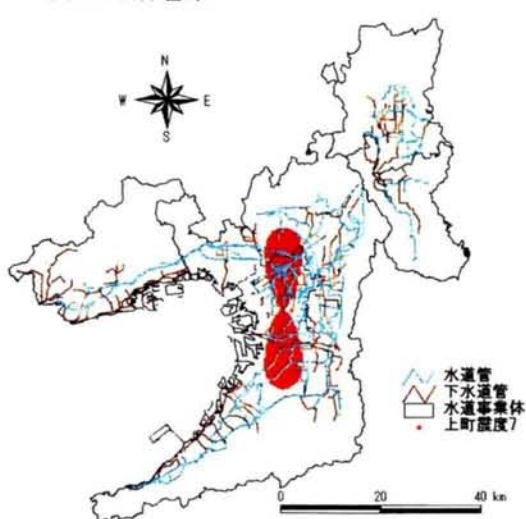
(3)有馬高槻断層系



(4)生駒断層系



(5)上町断層系



(6)六甲断層系

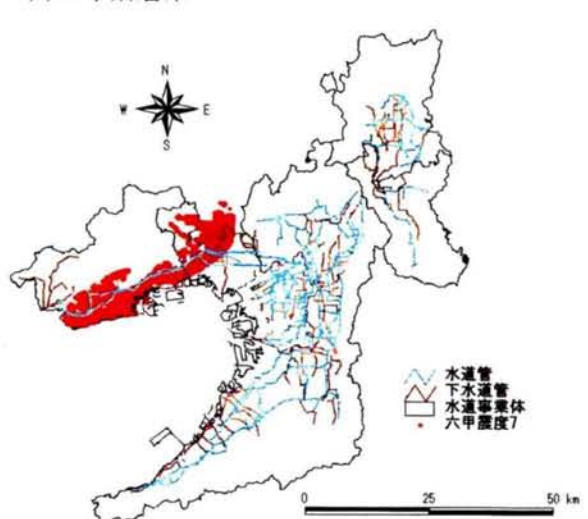


図 4-2 震度 7 の震災ハザードと水循環ネットワーク

表 4-1 震災により影響を受けることが予想される水循環施設

活断層系	水道浄水場	水道幹線管路等	下水処理場	下水幹線管渠
花折	【京都市】 新山浄水場・松ヶ崎浄水場 山ノ内浄水場・蹴上浄水場	【京都市】 琵琶湖疏水 各浄水場への全送水幹線	【京都市】 鳥羽処理場 吉祥院処理場	【京都市】 同左幹線
西山	なし	【大阪市】 豊野浄水場取水口・導水管	【京都府】 洛西・洛南の各浄化センター 【大阪府】 北部処理場（枚方市）	【京都府】 同左幹線 【大阪府】 同左幹線及び渚処理場幹線
有馬高槻	【大阪府】 村野浄水場 三島浄水場（枚方市） 中宮浄水場（企業団） 【阪神水道企業団】 甲山浄水場（西宮市） 鯉池浄水場（西宮市）	【大阪市】 豊野浄水場取水口・導水管 【大阪府】 村野浄水場取水口・導水管（淀川右岸） 中宮浄水場取水口（枚方市）	【京都府】 洛西・洛南の各浄化センター 【大阪府】 渚処理場・高槻処理場・中央処理場 北部処理場・香里処理場（枚方市） 都津処理場（交野市） 正雀処理場（吹田市） 池田処理場（池田市） 【兵庫県】 奥山処理場（芦屋市） 【神戸市】 鈴蘭台処理場	【京都府】 同左幹線 【大阪府】 同左幹線及び原田処理場幹線 【兵庫県】 同左幹線 【神戸市】 同左幹線
生駒	【大阪府】 豊野浄水場 【大阪府】 村野浄水場（門真市） 泉町浄水場（八尾市） 八尾浄水場（寝屋川市） 香里浄水場（枚方市） 中宮浄水場	【大阪市】 豊野浄水場導水管 【大阪府】 村野浄水場取水口・導水管 八尾浄水場取水口・導水管（寝屋川市） 香里浄水場取水口・導水管（枚方市） 中宮浄水場取水口・導水管	【大阪府】 渚処理場・高槻処理場 大井処理場（大和川下流） 香里処理場（枚方市） 都津処理場（交野市）	【大阪府】 同左幹線及び鴻池処理場幹線
上町	【大阪府】 柴島浄水場 【大阪府】 泉浄水場（吹田市）	【大阪市】 柴島浄水場送水管及び上町台地沿い全送水管 【大阪府】 村野・庭窪浄水場からの大阪府南部方面送水管 【阪神水道企業団】 猪名川・尼崎・甲山浄水場の全導水管と一部の取水口	【大阪市】 十八条処理場 【大阪府】 南吹田処理場・川面処理場（吹田市） 今池処理場（大和川下流） 津久野処理場（堺市）	【大阪府】 同左幹線及び上町台地沿い全ての幹線 【大阪府】 同左幹線及び泉北処理場幹線（堺市）
六甲	【阪神水道企業団】 甲山浄水場 鯉池浄水場（西宮市）	【阪神水道企業団】 西宮・芦屋送水管 【神戸市】 市内東西方向送水管	【神戸市】 鈴蘭台処理場・中部処理場 西部処理場・垂水処理場 【兵庫県】 奥山処理場（芦屋市）	【神戸市】 同左幹線及び東灘処理場幹線 【兵庫県】 同左幹線及び芦屋処理場幹線

注：淀川を水源とする浄水場及び淀川を水源とする浄水場からの水道水を下水処理している処理場について整理した。

響を及ぼすことが予想される。また、処理場と同時に下水幹線も被災するため、京都市内に存在する合流管渠では、管渠の閉塞により雨水吐から汚水が溢水して、河川に流出することが考えられる。このとき支川を通じて淀川本川への流入は避けられないため、下流で行われている水道水の取水に対して水質汚染による影響を及ぼすと考えられる。

② 西山断層系

淀川左岸に位置する大阪市水道の樟葉取水口が被害をうけ、導水を受けている豊野浄水場が影響を受ける。また、大阪府営水道と京都府営水道の1部の送水管が震災ハザードと重なっており被害が想定される。この断層では大阪市自体は震度7の被害を受けないものの取水口の被害によって水量が不足する間接被害の可能性はある。

下水処理場の集中する淀川の3川合流地区が被災する。ここには、流域下水道の処理場である洛南浄化センター・洛西浄化センターが位置している。この付近は地盤が軟弱であり危険度も高いと推察される¹⁸⁾。被災により淀川本川に未処理汚水が流出した場合には下流部の水道取水に深刻な影響を及ぼすことが予想される。

③ 有馬高槻断層系

この活断層系による震度7の分布域が他の活断層系と比較して最も広い。大きな影響を受けると考えられる事業体は大阪府営水道で、主要な浄水場である村野浄水場が震度7の区域に位置している。大阪市水道も樟葉取水口が被災し、豊野浄水場が機能しない可能性がある。また、阪神水道企業団や神戸市上水道は甲山浄水場で被害を受け、さらに西宮市から神戸市にかけての送水管が被害を受ける。

一方、京都、大阪、兵庫の広い範囲で12の下水処理場が影響を受ける。京都府の洛南浄化センター、洛西浄化センターの被災により本川下流の水道取水への影響が予想される。淀川右岸に位置する大阪府の高槻処理場、中央処理場等は被災しても未処理汚水は神崎川に流れ込み淀川本川には流入しない。しかし、左岸の処理場からの未処理汚水は本川に流入する可能性がある。兵庫県下では、神戸市の鈴蘭台処理場が被災する。

④ 生駒断層系

大阪市水道の豊野浄水場とその導送水管が被災する。また、大阪府営水道の想定被害は甚大で、村野浄水場が機能しなくなることに加えて、堺や泉南地域に水道水を供給している送水管がすべて震度7の区域を通っており、施設の直接的な被害を受けないにも関わらず、大阪府南部地域への水供給が困難となる可能性がある。

下水処理場に関しては、淀川右岸の高槻処理場、左岸の渚処理場、さらに、大和川下流域下水道の大井処理場までの南北の間で被災する。

⑤ 上町断層系

大阪市は震度7区域によって市中央付近で東西に分断される。大阪市水道の浄水場の配置は東部に偏っており、それら施設が機能しても西部湾岸域に水供給を行うことが不可能となる可能性がある。また、阪神水道企業団の淀川からの全導水管と1部の取水口が震度7区域に位置しており、淀川からの導水が困難になる可能性がある。

下水道施設では、大阪市の十八条処理場や吹田市の南吹田処理場等が被災する。また、大和川流域では今池処理場が被災する。大阪市内では、処理場が直接被害を受けるだけでなく、市内にある下水幹線管渠の多くが影響を受けるものと考えられる。

⑥ 六甲断層系

神戸市の都市部のほぼ全域が震度7区域に含まれている。また、阪神水道企業団の甲山浄水場が被災し浄水機能に影響を及ぼす。

神戸市内の下水処理場は、垂水処理場を除き被災する。同市は、東灘処理場を除いて分流通下水のため、合流管渠の閉塞による雨水吐からの汚水の溢水はないと思われる。しかし、処理場が鈴蘭台処理場を除いて湾岸部に位置しているため、処理場の被災は大阪湾の汚染の要因になる可能性がある。

4-3-2 水循環ネットワークへの影響に関する考察

震災により対象区域内の各水道事業体は、水道システムを構成する取水口・導水管・浄水場・送水管に大きな影響を受けることがわかった。また、震度7区域が重なる危険な区域にも水道施設が立地しており、このような場合には非常に危険である（例えば、大阪市の豊野浄水場導水管は西山、有馬高槻、生駒断層系の震度7区域に立地し、大阪府の村野浄水場は、有馬高槻と生駒断層系の震度7区域に立地している）。

地震の影響範囲は、単独の水道事業体の給水区域を超え複数の水道事業体に及ぶ。水道管理者は自らの給水区域内における個別対策だけを講じるのではなく、地震の影響を広域的に捉えた水道事業体相互の協力を前提とした対策を考えておく必要がある。

下水道事業体も水道事業体と同様に下水処理場や幹線管渠に大きな影響を受けることがわかった。震度7区域が重なる危険な区域には、流域下水道の処理場が立地している場合もあり危険である（京都府洛西・洛南の各浄化センター、大阪府渚処理場等）。

地震の影響範囲（震度7区域）は単独の下水道事業体の処理区域を超え隣接する複数の下水道事業体に及ぶ。この事情も水道事業体の場合と同様である。下水道管理者は、自らの処理区域内の対策だけを講じるのではなく、相互に補完して震災時でも処理を行えるような対策を考えておく必要がある。

対象地域内の主要な水道事業体と下水道事業体は、前述のように何れかの活断層系による震災の影響を受ける。これらの地震は同時には起きないと仮定しているため、各事業管理者は震災時の互助の認識を共有できるであろう。このことは、水道事業者相互、下水道事業者相互さらに上下水道の事業者が広域的に協力することの動機になり得ると考える。

具体的な対策としては、水道事業体間を連絡管で結ぶ相互水供給や下水処理水の利用などにより水を確保することが考えられる。

4-4 河川と都市活動への影響

4-4-1 河川への影響¹⁷⁾

河川と震災ハザードを重ねた結果を図 4-3 に示す。上町断層系により淀川の治水・利水の要である淀川大堰が被災することになる。また、大堰周辺の毛馬排水機場や堤防も被災する。水道ネットワークや下水道ネットワークの評価と同じ仮定を設け、震災ハザード（震度 7 区域）内の施設は機能しないと仮定するならば、上記の施設の被災により淀川本川は

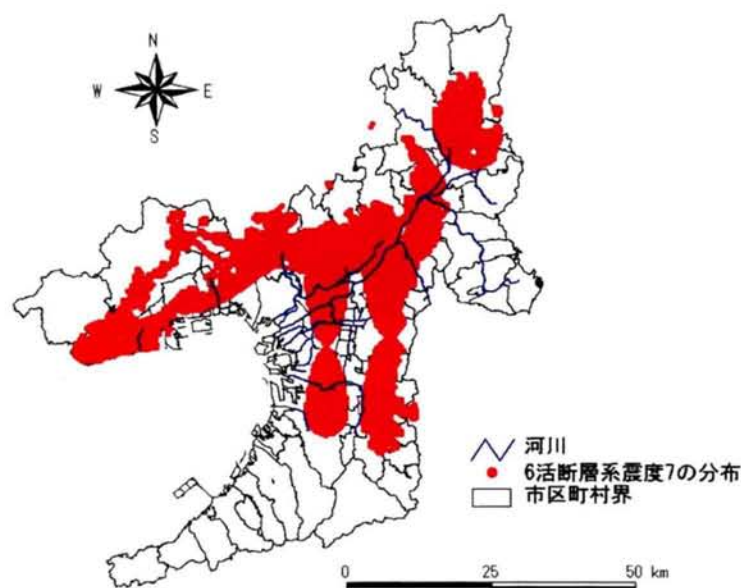


図 4-3 6つの震災ハザードと河川

治水・利水機能を損ない、大川（旧淀川）への放流も制御できなくなる。しかし、河川構造物の場合には施設が限定され耐震化が図られていること及び堤防は人工構造物であるが土堤であるため水道や下水道施設よりも地震に対しては強いと考えられることから上述の事項は可能性として指摘しておきたい。特に地盤の軟弱な淀川河口部、3川合流部は堤防本体の被災の可能性がある¹⁸⁾。ただし、出水期に河川堤防や河川構造物が被災した場合には、洪水による甚大な被害を受ける可能性がある。この点も重要である。

4-4-2 都市活動への影響¹⁵⁾

第 3 章では、淀川大都市域における水利用実態を整理し、震災を想定したときの都市活動影響ポテンシャルの観点から地域を考察した。前述の水循環ネットワークへの影響により、水供給が困難となる区域を考察したが、ここでは、まず、震災ハザードと利用水量の分布を重ね合わせ、震災が都市活動に直接的に及ぼす影響の大きさについて考察する。家庭用水への影響は、主に常住者の生活維持に対して影響を及ぼすことを表し、都市活動用水への影響とは、業務活動・営業活動や工場の稼動といった都市活動に対して影響するこ

とを意味している。

家庭用水利用量と6つの活断層系による震災ハザード、都市活動用水利用量と同震災ハザードを重ねた結果を図4-4と図4-5に示す。同図より、家庭用水では、有馬高槻断層系、上町断層系、花折断層系、六甲断層系の及ぼす影響が大きい。

有馬高槻断層系の地震により、神戸市から尼崎市、豊中市、淀川右岸の高槻市まで水利用量の多い地域が震災ハザードと重なるため、これら都市で影響が大きい。上町断層系は、大阪市内から堺市までの水利用量の多い範囲に震災ハザードを有するため、その影響は甚大である。花折断層系と六甲断層系は、京都市と神戸市の中心市街地に震災ハザードが存在するため影響が大きい。

また、都市活動用水に対しては、上町断層系が大阪市とその周辺都市に対して大きな影響を及ぼす。上町断層系による地震は、断層位置が大阪市の中心部を南北に伸びるため震災ハザードが都市活動の活発な区部を含みかつ豊中市、吹田市、堺市にまで影響を及ぼす。

次に、第3章の分析結果より、都市活動影響ポテンシャルの高い都市として位置付けられた、大阪市生野区、東成区、尼崎市、東大阪市、城東区等と震災ハザードを重ねてみると、生野区、東成区、東大阪市、城東区など多くがハザードと重なっており、震災の影響が都市活動そのものに対して影響の大きいことがわかる。

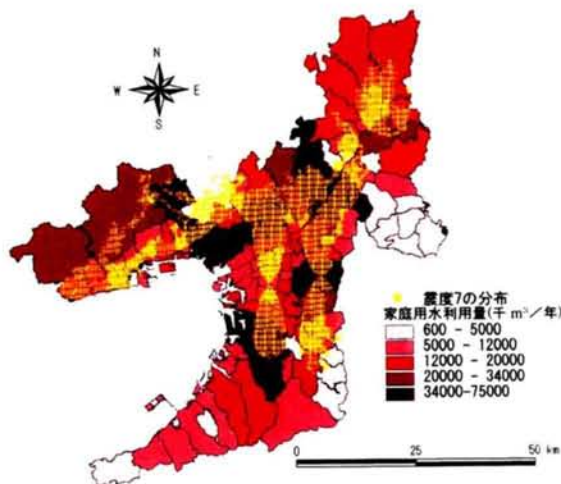


図4-4 家庭用水量と震災ハザード

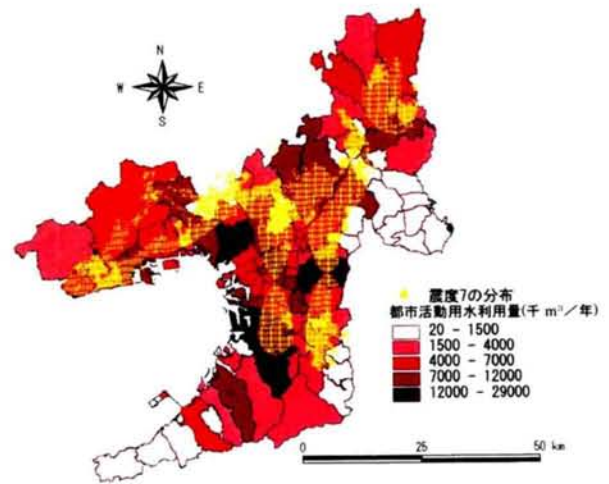


図4-5 都市活動用水量と震災ハザード

4-5 結言

本章では、活断層系による震災ハザードが淀川大都市域水循環システムの水道と下水道ネットワークに及ぼす影響を明らかとし、河川への影響と第3章の分析を踏まえた都市活動への影響の大きさについても考察した。この結果、以下の知見を得た。

(1) 広域を対象とした震度推定を行うことにより、対象地域の水循環システムへ大きな影響を及ぼすことが予想されるのは以下の6つの活断層系であることを明らかとした。

- ①花折断層系 ③有馬高槻断層系 ⑤上町断層系
 ②西山断層系 ④生駒断層系 ⑥六甲断層系

(2) 水道ネットワークにおいては、活断層系の地震により震災ハザード（震度 7 区域）内に位置する、京都市、大阪府、大阪市、阪神水道企業団などの主要な水道事業体を含む全 15 の浄水場、琵琶湖疏水及び多数の導・送水管路が影響を受けることを明らかにした。

(3) 下水道ネットワークでは、震災ハザード内に位置する、京都市、京都府、大阪府、大阪市、神戸市の下水処理場を含む全 23 の処理場と多数の下水幹線管渠が影響を受けることを明らかにした。

(4) 震災ハザードは、単独の水道事業体・下水道事業体の給水区域・処理区域を超え隣接する複数の事業体にまたがる。このため水管理者は自らの管理区域内における個別対策だけを講じるのではなく、震災の影響を広域的に捉えた対策を考えておく必要がある。

(5) 対象地域内の主要な水道事業体・下水道事業体は、何れかの活断層系による震災の影響を受ける。中には最大で 3 つの活断層系の影響を受ける施設も存在する。これら地震は同時には起きないと仮定するならば、事業管理者は震災時の互助の認識を共有できる。このことは事業体が広域的に協力することの動機になり得ることを指摘した。

(6) 河川構造物への影響については、淀川大堰が上町断層系の震災ハザード内に位置しており、被災した場合には淀川の治水・利水に大きな影響を及ぼす可能性のあることを指摘した。

(7) 水利用量の分布、都市活動影響ポテンシャルの高い都市を震災ハザードと重ね、震災が都市生活者の生活の維持と都市活動に及ぼす影響の大きいことを明らかにした。家庭用水では、花折断層系、上町断層系、有馬高槻断層系、六甲断層系が大きな影響を及ぼし、都市活動への影響では、上町断層系の影響が大きいことを指摘した。都市活動影響ポテンシャルの高い都市（区）も震災ハザードと重なり震災の影響が都市活動そのものに対して大きいことを示した。

【参考文献】

- 1) 清水康生・萩原良巳・阪本浩一・小川安雄・藤田裕介：水道システムの診断のための震災ハザードの推定，土木学会関西支部年次学術講演会，IV-80，2001.
- 2) 松田時彦：東京大学地震研究所報告集，Vol.65，pp.289-319，1990.
- 3) Kanamori,H.：Geophys.Res.82，pp.2981-2987，1977.
- 4) 武村雅之：日本地震学会・地震，第 43 巻，pp.257-265，1990.
- 5) Joyner,W.B.and Boore,D.M.：BSSA，Vol.71，No.6，pp.2011-2038，1981.
- 6) 小山順二：日本地震学会・地震，第 40 巻，pp.397-404，1987.
- 7) Geller,R.J.：BSSA,Vol.65，pp.1073-1093，1976.
- 8) 小林啓美・翠川三郎：日本建築学会論文報告集，No.290，pp.83-94，1980.
- 9) 気象庁：官報 1831 号，1996.

- 10) 活断層研究会編：新編日本の活断層（分布と資料），東京大学出版会，1991.
- 11) 池田安隆・島崎邦彦・山崎晴雄：活断層とは何か，東京大学出版会，1996.
- 12) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告（ライフライン施設の被害と復旧），土木学会，1997.
- 13) 日本水道協会工務部：阪神・淡路大震災における水道管路の被害と分析，水道協会雑誌第 65 巻，第 2 号，pp.39-53，1996.
- 14) 神戸市水道局：阪神・淡路大震災－水道復旧の記録，1996.
- 15) 清水康生・萩原良巳：震災時を想定した大都市域水循環システムの再構成のための地域分析，日本地域学会第 38 回年次大会，pp.163-170，2001.
- 16) 中瀬有祐・清水康生・萩原良巳・酒井彰：震災時を想定した大都市域水循環システムの総合的診断，環境システム研究，Vol.29，pp.339-345，2001.
- 17) 清水康生・秋山智広・萩原良巳：都市域における人工系水循環モデルの構築に関する研究，環境システム研究，Vol.28，pp.277-284，2000.
- 18) 京都府総務部消防防災課：京都府地震被害想定調査報告書，1998.

第5章 震災による水源汚染に関する分析

5-1 緒言

前章では、震災の水循環ネットワークへの直接的な影響について分析した。しかし、影響は、このような直接的な内容だけではない。地震が発生し、下水処理場が被災して、未処理汚水が河川に流出することを想定すると、下流部の利水に一定期間、深刻な影響を及ぼすことが予想される。また、下水幹線管渠の被災により、特に合流管渠では管渠の閉塞により雨水吐から汚水が溢水して河川に流出することが想定される。こうして下流の水環境汚染をもたらす水道取水に対して影響を及ぼす。さらに、このような水環境汚染への影響は下水道施設の被災だけに限らない。都市活動レイヤーに含まれる有害物質を扱う施設が被災した場合、水環境汚染や下流に位置する水道取水に影響を及ぼす。このような利水障害は、第3章で述べた直接的被害に対して間接的な被害であると言える。

まず、最初に淀川における平常時の利水障害の事例や文献から水環境汚染の特徴を明らかにする。特徴の1つとして汚染物質に関するデータ収集の困難さを挙げることができる。これは、行政が個人情報の開示を拒否する等の理由からである。

本章では、限られた入手可能なデータから水環境汚染のリスクマネジメントに関する有用な情報を抽出するための調査プロセスを提案する。同プロセスにより水環境汚染の汚染評価指標を選定し、同指標に係わる施設と震災ハザードをGISを用いて重ね合わせて表示する。これより、震災時の汚染被害発生の潜在的危険性に対する地域診断を行う。

さらに、被災した施設から有害物質が淀川に流入する経路を地形図を利用して推定する。淀川本川へ流入した場合を仮定し、水環境汚染が下流の水道取水へ及ぼす影響について分析する。

5-2 水環境汚染の実態とその特徴

5-2-1 淀川における過去の水質事故と震災による水環境汚染

淀川からは多くの水道事業体が取水を行っているが、水源の水質事故について「水質試験所調査研究（報告）ならびに試験成績：大阪市水道局」を基に事故の原因物質と主な発生源を整理すると表5-1のとおりである¹⁾。同表に示された発生源と原因については、特定できた内容から整理しているが実際には不明が多い。水質事故は、昭和40年代から50年代初頭の高度経済成長期と平成になってから現在までの期間で多くの報告がなされている。その原因物質をみると40年代にはシアンなどの毒物が流出しているが、近年は油が原因の事故が多くなっている。また、これらの水質事故の発生源を地域的にみると枚方市や京都市南部で比較的发件数が多くなっている。汚染経路の特色としては、工場等から流出した汚染物質が支川を通じて淀川本川に流入するケースが多い。

一方、淀川の流下時間は、水源汚染が発生したときに下流への到達時間を推定する重要な目安となる。淀川水質協議会が行った浮子による実測調査（1998・1999）によると、表5-2の結果が得られている²⁾。同調査によると平水時では表面流速で計算して、本対象区間の新宇治橋（宇治川）から淀川大堰直上流の阪神水道企業団の柴島取水口まで約29時間で流下することになる。流下速度は、淀川本川に合流してから淀川大堰の間で遅くなる。これは淀川大堰の背水の影響と考えられる。このため、ひとたび淀川本川に有害物質が流入すると長時間に渡って汚染の影響が続く危険性がある。特に、渇水時には、下流の淀川大堰が閉じられており³⁾、流下時間はさらに長くなる。このような状況下で震災により工場等が被災し、有害物質が流出し淀川に流入した場合には、水道取水への影響は水量と水質面において深刻な事態になると考えられる。しかも、大阪湾を汚すか、取水を停止し続けるかという困難なトレードオフ問題が生ずる。

表 5-1 淀川水系^注における水源水質事故発生件数（1959～1999）¹⁾

原因物質	件数	主な発生源と理由	備考
① 油	393	工場（維持管理ミス）・産業廃棄物処分場（流出）・事故等	
② 色	38	工場（維持管理ミス）・不法投棄（産業廃棄物等）等	
③ 異臭	52	工場（フェノール汚染等）・琵琶湖でのウログレナ発生等	
④ （かび臭）	29	琵琶湖南湖での植物性プランクトンの増殖	③の内数
⑤ 濁度	17	工場（維持管理ミスによる沈殿物流出）・工事用水流入等	
⑥ 農薬	4	操作使用ミス等	
⑦ フェノール	12	工場（維持管理ミス）・不法投棄等	40ppb 以上
⑧ シアン	8	不法投棄・工場（廃液の未処理排水）等	
⑨ 魚浮上	83	油・薬品の不法投棄等	
⑩ その他	63	工場排水（維持管理ミス）等	
計	670	—	

注：本研究で対象とする区域を含む水系全体集計である。

資料）大阪市水道局：水質試験所調査研究（報告）ならびに試験成績，1969～2000。

表 5-2 淀川流下時間²⁾

河川	区間（距離）	低水時		平水時	
		平均流速	表面流速	平均流速	表面流速
淀川本川	御幸橋～阪神水道企業団 柴島取水口・右岸 (26.7 km)	約 44 時間	約 37.5 時間	約 30 時間	約 25.5 時間
宇治川	新宇治橋～御幸橋 (13.6 km)	約 4.5 時間	約 4 時間	約 3.5 時間	約 3 時間
桂川	1 号井堰～淀川本川 36km (8.4 km)	約 3.5 時間	約 3 時間	約 4 時間	約 3.5 時間
木津川	泉大橋～宇治川合流・右岸 (26.5 km)	約 13 時間	約 11 時間	約 9 時間	約 7.5 時間

資料）淀川水質協議会：淀川流況調査業務報告書，2000。

5-2-2 水環境汚染の特徴⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾

(1) 水環境汚染の特徴

水環境汚染のリスクマネジメントには、規制強化、人工的水循環系の機能改善、発生源での抑制及びモニタリングがある。近年は PRTR (Pollutant Release and Transfer Register) が行われている⁸⁾。しかし、汚染被害を認知することの困難性や関係する情報を集約する困難さから、現在のところこれらマネジメントの有効性は必ずしも明確でないと思われる⁹⁾。このようにリスクマネジメントを困難にしている水環境汚染の特徴として以下の点をあげることができる。

- ①汚染物質が多種多様であり流出経路が複雑である
- ②複数の汚染物質による累積的影響・長期間の蓄積的影響を受ける可能性がある
- ③被害や影響の現れ方を時間的・空間的に特定することが困難である
- ④汚染に関して得られるデータが技術的要因・社会的要因によって限られる

1) 汚染物質の多様性と流出の複雑さ

水環境汚染に関わる汚染物質としては、下水処理場・し尿処理場及び不特定の場所から流出する有機物、工場・廃棄物処分場等から排出される化学物質・重金属、ゴルフ場・田畑からの農薬、畜舎からの病原菌、さらに藻類などが原因の場合が考えられる。化学物質は、工場やクリーニング店で洗浄剤として使われる揮発性有機化合物を含む有機溶剤や界面活性剤、浄水場における浄水処理の副生成物であるトリハロメタン、廃棄物処理場からの燃烧副生成物であるダイオキシンや環境ホルモンとして知られている内分泌攪乱化学物質等他にも多くの有害化学物質がある。畜舎排水に含まれている 0157 やクリプトスポリジウムに代表される病原性大腸菌や原虫も水系で伝染する。

河川へ流出する経路は、直接河川へ流出する物質、大気から降雨と共に落ちてくる物質及び地下水から漏出してくる物質と様々である。このように数多く存在する水環境汚染物質は、その存在量や河川へ流出する経路だけでなく、人の健康や生命、生態系への影響の度合いも重金属・ダイオキシン・有害化学物質のような致命的な影響を及ぼす物質から有機物のように濁りや色に影響するものまでである。

2) 累積的・蓄積的な影響

化学物質、環境ホルモン、病原菌など、汚染物質は 1) で述べたように多種多様である。これらの物質は、存在する単位が非常に微量で検出することが困難な場合が多い。人間はこれらの物質を、主に食物を通して体内に摂取するが、その結果、重金属や環境ホルモンなどは、体内に蓄積・濃縮され致命的な影響をもたらすことがある。同時にその影響は単一の汚染物質でなく複数の物質による累積的な影響として発現する場合がある。

3) 被害や影響を特定することの困難さ

汚染物質の河川への流出は、下水処理水や工場排水として短期間で流出する場合や廃棄物処分場から地下水を経由して長期間かけて流出する場合がある。また、工場からの排煙や自動車の排気ガスとして大気に放出され降雨と共に降下するなどの経路を経た場合、流

出期間は推定が難しい。さらに、汚染物質の発生源は、空間的特性として下水処理場や工場のように特定汚染源である場合と道路や構造物等に落下して流下する非特定汚染源がある。1)2)で指摘した理由に加え、このような汚染物質の時間的・空間的な広がり被害や影響を特定することを困難にしている。

4) 汚染に関して得られるデータの制約

そして最も水環境汚染のリスクマネジメントを困難にしているのが入手可能なデータが限られていることである。データにも人口・面積・工場数等の統計データ、水質・大気・土壌に関する汚染物質の計測データ及び工場や事業場の住所などの個人データといったように様々な種類がある。微量化学物質、ダイオキシン、環境ホルモンは、ppt（1兆分の1）のオーダーで存在するものもあり計測が難しい。また、高い費用がかかるためデータを計測していないことやされていてもデータを公開していないことが多い。汚染の発生源でみても、一般・産業廃棄物処理場や処分場等ほとんど全てといって良いほど浸出している汚染物質の計測を行っていないか、行っていないかも知ることはできないというのが現状である。また、計測データだけでなく、畜舎の位置等は個人情報のため公表されていない。水環境汚染が問題となっているにもかかわらず関係する種々のデータを取得することができない。この1つの理由は前述の技術的要因である。しかし、汚染が発覚し問題になった時に責任を問われないために「計測しない・公表しない」といった行政の怠慢または逃避という社会的要因もあると思われる。以上に述べた特徴が水環境汚染に関わるリスクマネジメントを困難にしていると考えられる。

(2) 本研究での枠組み

複雑な水環境汚染を捉えるための枠組みとして、大気、降雨、地下水といった水文循環をも含めた水循環システムを考え、汚染発生源から河川へ流入する経路を想定する。想定する経路は、直接河川へ・下水道から河川へ・地下から河川へ・大気から河川への4つが考えられる。

発生源としては、下水処理場、し尿処理場、工場、小規模工場・事業場、生活排水、ゴルフ場、一般・産業廃棄物処理場、一般・産業廃棄物最終処分場、田畑及び畜舎を特定汚染源とし、自動車排ガス、道路・屋根・構造物等、山林を非特定汚染源として考える。

汚染物質は有機物、栄養塩類、重金属、揮発性有機化合物(VOC)、油類、農薬類、伝染性病原菌、環境ホルモン、有害大気汚染物質を考える。これらの発生源・経路・汚染物質を整理し、それぞれの関係を図5-1に示す。

図中の*印を付けている施設は被災により有害物質を流出する可能性のある施設であり、太線で示した経路で河川に流入すると考えられる。同図より1つの発生源からでも複数の経路を経て河川へ流入する場合があります、それぞれの経路により流出する汚染物質も異なることがわかる。

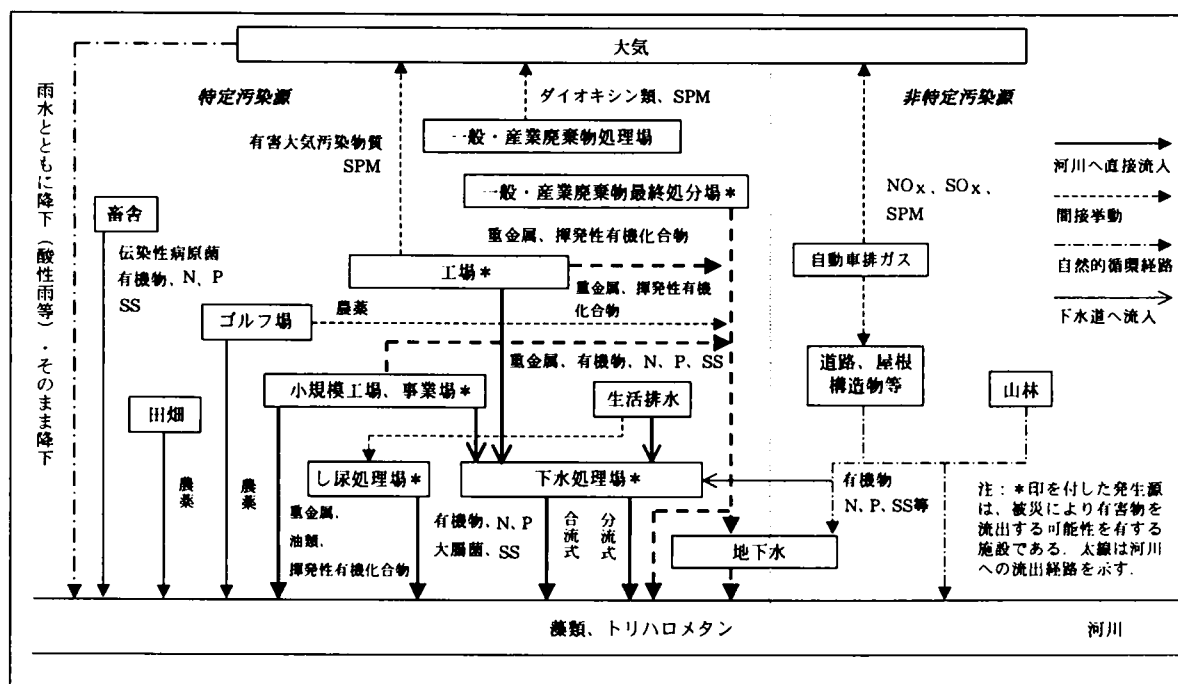


図 5-1 流域レベルでみた水環境汚染のメカニズム

5-3 震災リスクのマネジメントのための調査プロセス

5-3-1 調査の意義と調査プロセス ⁴⁾¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾

(1) 調査の意義

阪神・淡路大震災は、複数の都市の上下水道システムに大きな被害を及ぼした災害であった。震災対策は第4章で指摘したように、広域性を前提として議論する必要がある。水環境汚染問題も同様に広域的な視点で捉えるものとする。

一般的に汚染のメカニズムを解明するには自然系の循環も考慮する必要があるが、流域レベルという広範囲における汚染に対して個別に解明を試みることは困難である。このような問題に対して、定量的データが無いということで諦めるのではなく、入手可能な限られたデータから有用な情報を提示する調査プロセスを示す。

ただし、ここで出力される内容は、1つの工場を対象とした局所的な環境汚染問題を現地調査データに基づいて説明するといった内容ではない。あくまで、物質名称・汚染の位置・排出量に関して一般的に入手できる範囲の情報に基づく考察である。しかし、水道事業者にとって対策を講じる必要があるか否か以前の問題の存在を知る重要な情報である。本研究で提示する情報は水循環システムに対するハザード情報として意味がある。

本章では、水環境汚染に関する問題が複雑で入手可能なデータが明らかに限られているため、調査の段階で問題の明確化を行い、目的（分析、評価、代替案の設計等）のためにどのようなデータがあれば良いのか、またデータが無い場合にどうするかということを順序立てて考える方法を提示する。

(2) 調査のプロセス

水環境汚染問題に対する調査プロセスとして図 5-2 を提案する。以下、同図を説明する。

Step 1 : 汚染要因の構造化

汚染要因とは、「汚染発生源」「汚染経路」及び「汚染物質名」のことである。特定汚染源と非特定汚染源で分類される空間的特性、発生源から排出された汚染物質が河川へ流入するまでの期間が短期か長期かといった時間的特性と流入経路及び汚染物質名について相互関連を水循環システムを介した構造として把握する。汚染発生源の所在地と流出経路及び汚染物質名の関係を明らかにし、発生源を含めた経路上において汚染物質に関する情報を取得必要データとして特定する。

しかし、この3つの汚染要因は揃わないことが多い。事実、表 5-1 で示した過去の水質事故では、汚染発生源や汚染経路が不明であり、汚染に関する取得必要データを限定せざるを得なかった場合が多く報告されている。汚染要因の構造化は、無闇にデータ収集をすることがないように、取得必要データの位置付けを明確化するプロセスである。

Step 2 : 取得可能データの選定

次に、前節で述べた水環境汚染の特徴より取得必要データが取得可能であるか不可能であるかを判断する。例えば、非特定汚染源から排出される汚染物質量は発生源が特定できないため計測データが得にくい。

また、発生源が特定汚染源であっても、一般・産業廃棄物最終処分場や処理場から大気や

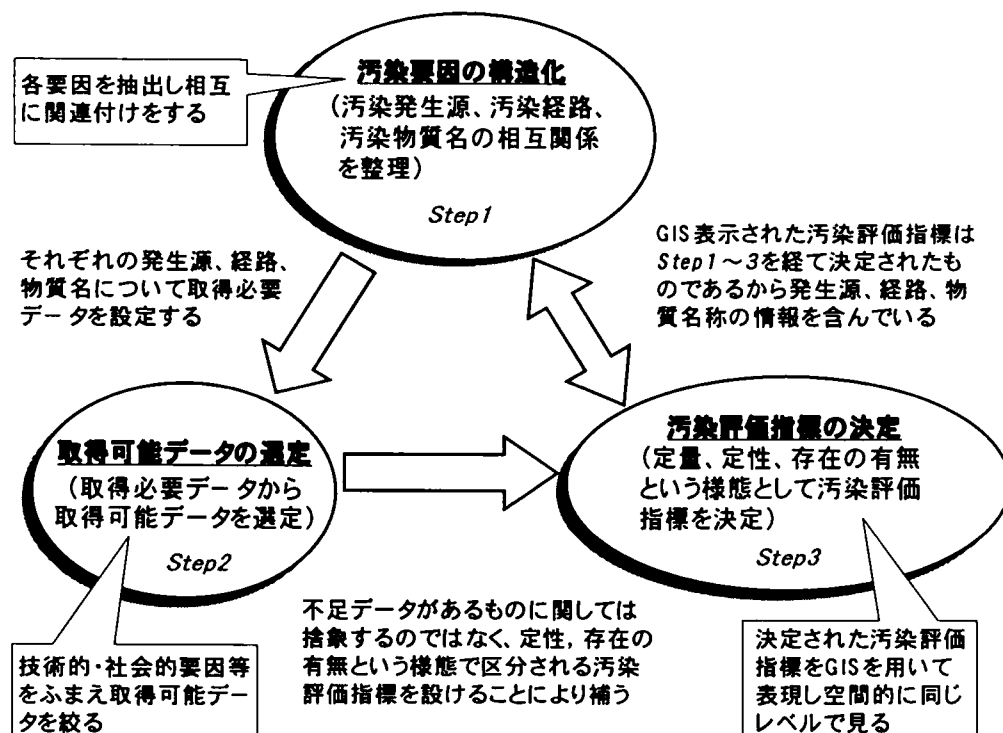


図 5-2 水環境汚染問題に対する調査プロセス

地下を経由し長期間（または短期間）を経て河川へ流入するような汚染物質の流出量を考えた時、汚染の不確実性などから行政がデータ取得まで踏み込めないといった社会的要因もある。さらに、汚染物質が環境ホルモンなどの微量化学物質であるため、計測が困難であるという技術的要因から特定汚染源としての位置データは取得可能であるが、汚染物質の排出量データは取得不可能となる場合もある。このように取得必要データが取得可能か不可能かは汚染要因の構造と深い関係を有する。

Step 3：汚染評価指標の決定

希望するデータが無いからといって水環境汚染の状況が全く把握できないという訳ではない。取得可能データから現状の汚染状況をどこまで捉えることが可能かという限界を知っておくことは意義がある。そこで、取得可能データによって水環境汚染を把握するための汚染評価指標を決定する。汚染評価指標は、発生源の位置（または発生源の数・面積）、排出量（浸出量）、汚染物質名として与えられる。しかし、これらは全て取得可能とは限らないため、汚染評価指標の様態（condition）を「定量的（quantitative）」、「定性的（qualitative）」、「存在の有無（exists or not）」の3つのレベルで捉える。

すなわち、「定量的」に見ることができるとは、発生源の位置、排出量、汚染物質名が全て既知の場合であり、「定性的」にしか見ることができないとは、物質名以外で1つでもわからない場合である。さらに、「存在の有無」で見るとは、発生源の位置はわかるが物質名は特定できず何らかの危険物質が排出(浸出)されている場合である。

上記のプロセスを経て得られた汚染評価指標は、その決定時に水環境汚染を把握できる限界がわかり、同時に環境汚染リスク軽減の可能性も推察できる。すなわち、定量的に把握できる汚染評価指標が多いほど汚染の制御に関して問題が明確化されており、その意味で制御が容易である。一方、定性的、存在の有無でしか把握できない汚染評価指標が多ければ汚染に対するリスクマネジメントの困難さは大きくなる。

5-3-2 淀川大都市域を対象とした汚染評価指標

前項で示した調査プロセスに沿って、震災時における水環境汚染に関する汚染評価指標を決定する。

(1) 汚染要因の構造化

汚染要因である発生源の種類を都市生活者の視点から生活系、工業系、農業系及び自然系で分類する。震災発生時に有害物質を流出する可能性がある発生源として、図 5-1 に示した下水処理場（分流式、合流式）、し尿処理場、工場、小規模工場・事業場（一般機械製造業、金属工業、化学工業、鉄鋼業、代理店を除くクリーニング店）、一般・産業廃棄物最終処分場を対象とする。

淀川本川には、図 3-1 に示したように多くの水道取水口が存在する。水環境汚染によるこれらへの影響を判断するため、淀川本川への流入経路を想定する。経路は、下水処理場から淀川へ、発生源から直接淀川へ、地下から淀川への3経路を想定し、大気を経由する

経路は本分析が震災時を対象とするため想定しないものとする。

また、発生源から汚染物質が排出されてから淀川へ流入する時間に関しては、前述の経路のうち地下を経由する場合のみ長期と考え、あとの2経路に関しては短期とする。

汚染物質としては、有機物、栄養塩類、重金属、揮発性有機化合物、油類、伝染性病原菌、環境ホルモンを考えるものとする。なお、汚染物質の中で化学的に似た性質を持つ物質や挙動が似た物質については、まとめて1つの代表指標をおいて代替するものとした。すなわち、有機物であればBOD・SSで、地下水を経由して流入する重金属であれば土壤に吸着されにくく移動しやすいものと吸着されやすく移動しにくいものとに分け、前者を六価クロムで後者を水銀で代表する。揮発性有機化合物であれば、ジクロロメタン及びトリクロロエチレンで、油類はベンゼンで代表するなどである。ただし、多くの場合において、これら代表指標を有機物、重金属、揮発性有機化合物、その他有害物質といった大分類項目として扱わざるを得ない。例えば、一般・産業廃棄物最終処分場から地下水に浸出し長期間経た後に河川へ流入する物質名を特定することは困難である。このため、何らかの汚染物質が浸出している、または浸出する可能性があるため、その他有害物質という大分類項目を代表指標とせざるを得ない。

(2) 取得可能データの特定

取得必要データの中で排出量データは、ほとんど技術的及び社会的要因のために取得不可能であった。畜舎は位置でさえも個人情報と公開しないという理由で取得不可能であった。工場の位置については、数が非常に多いため市区町村単位の工場数で代替した。また、これらの技術的・社会的要因でなく取得不可能であると判断する場合もある。例えば、非特定汚染源の発生源の位置データや排出量データである。

(3) 汚染評価指標の決定

前節で明らかになった取得可能データから汚染評価指標とその様態を決定するプロセスを下水道を例として図5-3に示す。

これら汚染評価指標をGISを援用して重層的に表示することによって、対象地域の汚染要因の構造を視覚的に捉えることができる。このことにより、地域としての汚染状況を総合的に理解できる。

(4) 汚染評価指標の様態

取得可能データの組合せから汚染評価指標の様態(定量、定性、存在の有無)を決定した。これら取得可能データは、汚染要因の構造と関係がある。

汚染要因の構造と汚染評価指標の様態との関係を表5-3に示した。同表から定量的に見ることができるのは、下水処理場(分流式)、し尿処理場、規模の大きな工場だけである。他の汚染要因に関しては、取得可能なデータが限られているため、定性か存在の有無という様態でしか捉えられていない。しかし、それら様態のデータでも水環境汚染を理解する手がかりであることに変わりなく、むしろ違った様態であってもGISを用いて同じ流域レベルで併記して見ることができること自体に意義がある。すなわち、ここで重要なことは、

表 5-3 震災時を想定した汚染要因の構造化と汚染評価指標の様態分類

汚染要因の分類	汚染要因の構造			汚染評価指標の様態			分類
	発生源・施設	河川への流入経路	代表指標	位置	物質名	排出量	
生活系	下水処理場	→河川	BOD・大腸菌・N・P	○	○	○	定量
	下水処理場雨天時越流水	→河川	環境ホルモン	○	○	—	定性
	し尿処理場	→河川	(下水+地表面流出水)	○	△	—	存在の有無(物質名は特定できない)
	一般廃棄物最終処分場	→河川	BOD・大腸菌・N・P・SS	○	○	○	定量
		→地下水→河川	重金属	○	○	—	定性
工業系	工場	→地下水→河川	ダイオキシン類	○	○	—	定性
		→下水道→河川	有機物・N・P	○	○	○	定量
		→地下水→河川	重金属	○	○	○	定量
	小規模工場・事業場	→地下水→河川	揮発性有機化合物(VOC)	○	○	—	定性
		→河川	有機物・N・P・重金属・VOC・油類	△	△	—	定性(位置でなく数で把握)
		→下水道→河川	有機物・N・P・重金属・VOC・油類	△	○	—	定性(位置でなく数で把握)
		→地下水→河川	重金属・VOC	△	○	—	定性(位置でなく数で把握)
農業系	産業廃棄物最終処分場	→地下水→河川	ダイオキシン類・重金属	○	○	—	定性
	畜舎	→河川	その他有害物質	○	—	—	存在の有無
			有機物・N・P	○	○	—	定性
			伝染性病原菌	○	—	—	存在の有無

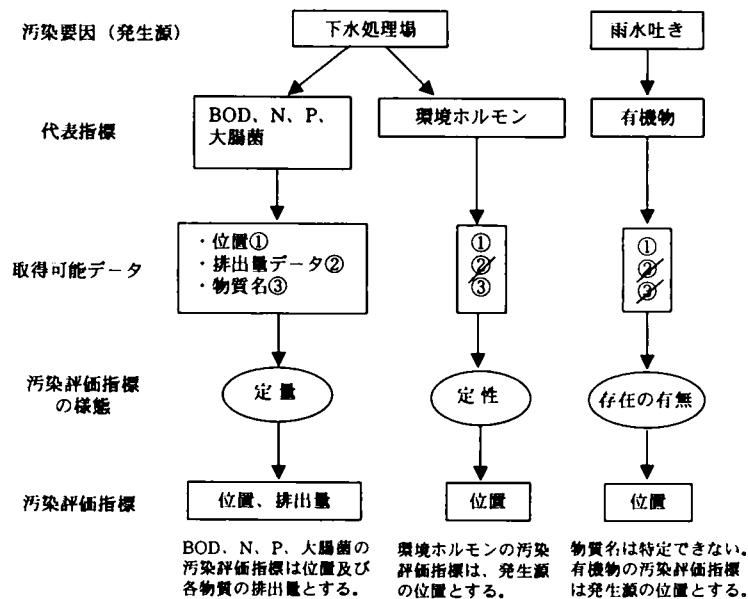


図 5-3 汚染評価指標の決定プロセス（下水道の例）

GIS で表現した一般・産業廃棄物最終処分場(位置)、工場・小規模工場・事業場(数)等のポイントまたはポリゴンを見て、どの経路からどのような汚染物質が排出されているか、または排出される可能性があるかを知ることが可能になった点である。

これらは、水環境汚染問題を考える際に意味のある情報である。既存のデータを用いて流域レベルで水環境汚染を捉えようとした時の限界が、定性または存在の有無という汚染評価指標の様態をおくことにより把握できるようになったと考える。

また、定性・存在の有無でしか捉えられないというのは定量的な取得必要データが得られないためであるが、このことはリスクマネジメントの観点からは有効な情報である。例えば、その発生源に関してモニタリング調査を実施することや定期観測点の位置を決定する根拠になり得ると考える。

5-4 対象地域における分析

5-4-1 有害物質を扱う施設の分布からみた地域診断

ここでは、選定した汚染評価指標を用いて震災時に水源汚染の原因となる地域の汚染ポテンシャルについて考察する。

(1) 震災想定時の汚染ポテンシャル指標

被災した時に汚染につながる発生源として、汚染物質に関わる処理・処分を行っている施設、もしくは汚染物質を貯留・移動させている施設を考える。具体的には、前述の下水処理場、し尿処理場、工場、小規模工場・事業場(一般機械製造業、金属工業、化学工業、鉄鋼業、代理店を除くクリーニング店)、一般・産業廃棄物最終処分場を対象とする。下水処理場を対象としたのは、阪神・淡路大震災において震度 7 区域の近傍に位置していた神

戸市東灘下水処理場が甚大な被害を受け、機能が停止したことを考慮している¹³⁾。

(2) 水環境汚染をもたらす可能性の高い地域

震災時を想定し、震災ハザード（震度 7 区域）と汚染評価指標の分布を GIS の援用により重ね合わせ、地域の汚染ポテンシャルについて考察する。なお、考察の対象は震災時に淀川本川に有害物質を流出する可能性のある表 5-4 に示す淀川沿いの 7 つの地域とする。

表 5-4 淀川本川に対する汚染ポテンシャルの分析地域

地域名称	構成市区町村
①京都府桂川右岸	京都市西京区，向日市，長岡京市，大山崎町
②京都府桂川左岸・宇治川右岸	京都市（西京区を除く全区）
③京都府宇治川左岸・木津川右岸	久御山町，宇治市，城陽市，井手町，山城町
④京都府木津川左岸	加茂町，八幡市，京田辺市，木津町，精華町
⑤大阪府淀川右岸（大阪市除く）	豊中市，池田市，吹田市，高槻市，茨木市，箕面市，摂津市，島本町
⑥大阪府淀川左岸（大阪市除く）	守口市，枚方市，八尾市，寝屋川市，大東市，柏原市，門真市，東大阪市，四条畷市，交野市
⑦大阪市（淀川左右岸）	大阪市の全区

想定する活断層系は、各地域に影響を及ぼすと考えられる花折断層系、西山断層系、有馬高槻断層系、生駒断層系、上町断層系の 5 つである。活断層系による地震が起きた時、震災ハザード上のポイント（存在の有無データとして与えられた施設）とポリゴン（定性的データとして行政区単位の工場数として与えられた施設）で表される施設は被災し、汚染物質が直接河川（本川・支川）へ流入するか、地中へ浸出する可能性があると考え。これら有害物を扱う施設の分布を図 5-4 に示す。

(3) 流出経路の推定に基づく地域診断

河川への流入については支川の位置と施設の地盤高等を考慮して地形図より判定する。すなわち、汚染水の流出経路を地形図から判読し淀川本川への流入の可能性を考慮した地域診断を行う。表流水の河川への流出経路に関しては、国土地理院作成の 250m メッシュ地形図（地盤高）と小河川のラインデータを基に被災施設からの有害物質の流下方向を推定する（図 5-5 参照）。支川流域で震度 7 区域内に立地する施設が被災した時、流出した汚染水が流下する方向は支川方向であると考え、流域から離れている場所では地形図を参考として高地から低地へ流れるとし、低地から近辺の小河川に流入すると考える。

地下へ浸出し地下水により移動する経路に関しては、地下水位データを用いて流れの概略の方向を把握することを試みたが、表流水のように流出経路を推定することは困難であった。しかし、実際に工場や廃棄物最終処分場からの漏出水、浸出水が重大な地下水汚染を引き起こしている事例から考えても¹⁴⁾、これら施設が被災することによって地下水汚染が発生し、施設周辺に位置している水道事業体の井戸や河川に影響を及ぼす可能性については指摘できると考える。以下に、各地域を考察する。

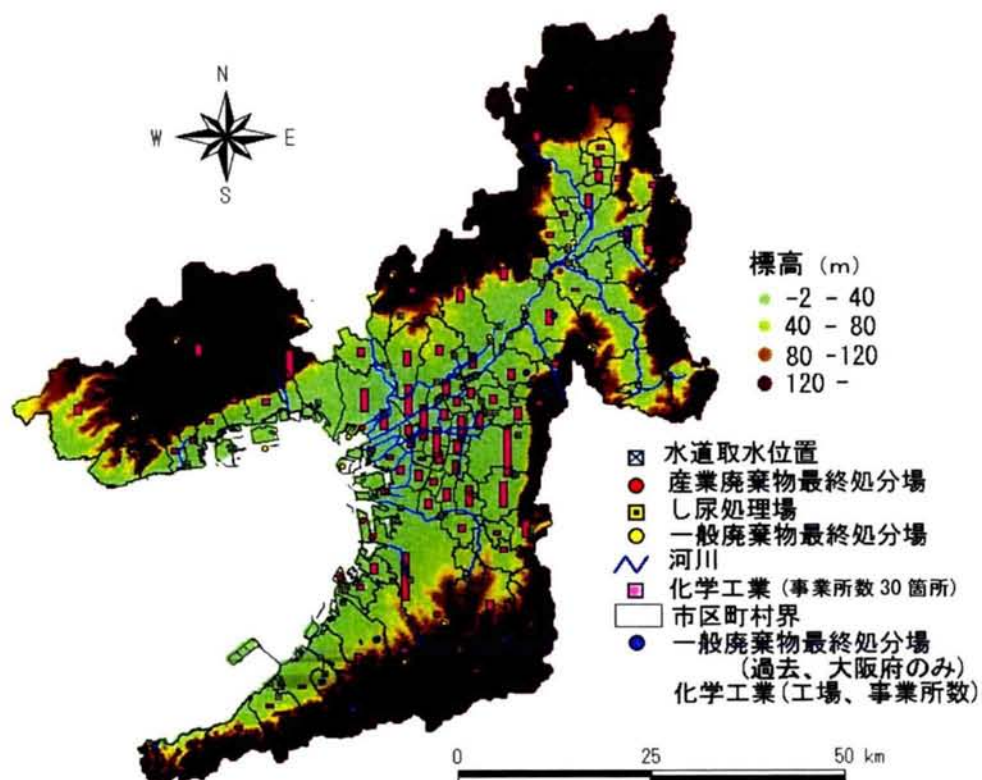


図 5-4 震災時を想定した水環境汚染要因

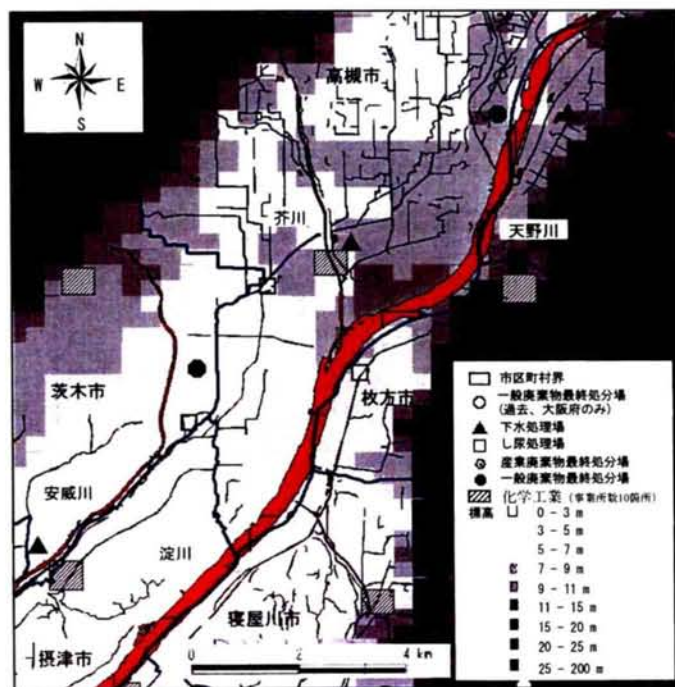


図 5-5 地形図を利用した流出経路の推定 (淀川右岸の事例)

① 京都府桂川右岸

本地域に影響を及ぼす活断層系は、西山断層系と有馬高槻断層系である。被災するのは、桂川下流域の三川合流地点付近の下水処理場、し尿処理場及び一般廃棄物最終処分場である。この結果、下水処理場とし尿処理場から未処理の汚水が直接河川へ流出し、有機物、栄養塩類等による汚染が発生する可能性がある。一般廃棄物処分場も被災するため、長期間にわたって地下水を汚染し有機物や重金属汚染が下流域に影響を及ぼし、淀川から取水している水道事業体に影響を及ぼす可能性もある。

② 京都府桂川左岸・宇治川右岸

花折断層系の震災により、京都市内中心部、伏見区、西京区において下水処理場、工場、小規模工場・事業場（クリーニング店等）が被災する。このため、有機物、重金属、揮発性有機化合物及び油類等の複数の汚染物質が河川へ流出する。本地域は上流部に位置するため下流域へ及ぼす影響は大きい。また、産業資源ともなっている地下水を長期間にわたって汚染する可能性がある。

③ 京都府宇治川左岸・木津川右岸

本地域は、何れの活断層系からの影響も受けない。また、本地域は上流に位置しているが下流域への影響はない。

④ 京都府木津川左岸

西山断層系及び有馬高槻断層系により、木津川下流の三川合流地点付近において下水処理場とし尿処理場が被災する。また、合流点付近では、西山断層系と有馬高槻断層系のハザードが重なっており、被災の可能性が高い。下水処理場とし尿処理場から未処理の汚水が直接河川へ流出し、短期間で有機物等による汚染が発生する可能性がある。その時には下流域への影響が大きい。

⑤ 大阪府(大阪市を除く)淀川右岸

関係する活断層系は、島本町が西山断層系、高槻市が生駒断層系、豊中市と吹田市が上町断層系、全体として有馬高槻断層系である。本地域では、これら複数の活断層系による震災が想定される。まず、西山断層系では、し尿処理場が被災し、生駒断層系により安威川流域の下水処理場、し尿処理場、一般廃棄物最終処分場、小規模工場・事業場（クリーニング店等）が被災する。また、上町断層系によっても神崎川流域の同様の施設が被災する。さらに、有馬高槻断層系に至っては、震災ハザードが京都府の三川合流地点から兵庫県内まで広範囲に広がるため、豊中市及び吹田市の南部を除いて淀川右岸のほとんどの下水処理場、し尿処理場及び一般廃棄物最終処分場等が被災する。このため、有機物、栄養塩類、重金属、揮発性有機化合物、油類等の様々な有害物質が流出する。ただし、安威川と神崎川が存在するため有害物質の流出全てが淀川本川の汚染につながる訳ではない。

⑥ 大阪府(大阪市を除く)淀川左岸

大阪府淀川右岸と同様、複数の活断層系の影響を受ける。すなわち、生駒断層系が全域にわたって影響し、有馬高槻断層系が枚方市西部及び寝屋川市北部へ影響する。また、西

山断層系は枚方市北部へ影響する。

生駒断層系により、当該地域の下水処理場、し尿処理場、一般・産業廃棄物最終処分場、東大阪市及び八尾市を中心とした多数の工場、小規模工場・事業場（クリーニング店等）が被災する。まず、当該地域では、下水処理場、し尿処理場、工場の数が非常に多いため、河川へ流出した場合には、短期間に流出する汚染物質が多い。流出する汚染物質として考えられるのは、有機物、栄養塩類、重金属、揮発性有機化合物、油類等である。産業が活発な地域であるため、水環境汚染の視点からは非常に危険であると言える。また、工場からは有害物質が地下へ浸出するため、長期間にわたって汚染が継続する可能性がある。特に、枚方市では3つの活断層系の影響を受けるため、同地域の支川から本川へ流入し下流域へ影響を及ぼす可能性が高い。

⑦ 大阪市淀川右岸及び大阪市淀川左岸

大阪市は上町断層系の影響を受ける。下水処理場は3箇所では被災するが、下流に水道の取水施設が無い場合水道システムへの影響は無い。しかし、下水処理場、工場等から短期間に流出する有害物質により、有機物、栄養塩類、油類、重金属等による大阪湾の汚染の可能性はある。

5-4-2 水道取水への影響

地域診断を踏まえて、淀川本川に位置する14の取水口について震災想定時に上流から受ける影響を汚染ポテンシャルと水利権量の2項目から診断する。汚染ポテンシャルとは、6活断層系により各取水口が影響を受ける工場等の有害物を扱う施設の合計数である。

各取水口の水利権量と対応する汚染ポテンシャルを表5-5に示す。同表では、下水処理場のような位置を特定できるデータと工場数など位置を特定できない（定性）データを併せて記載している。同表に示す有害物を扱う施設が被災した場合には、流出した汚染物質が支川を通じて淀川本川に流入し水道水源に影響を及ぼすことが想定される。まず、上流に位置する大阪市の樟葉取水口は6つの活断層の内、生駒、上町、六甲を除く3つの活断層系の影響を受ける。その下流では穂谷川（淀川左岸）と桧尾川（淀川右岸）が流入するため、これら河川が西山・有馬高槻・生駒活断層系の震災による新たな汚染物質の流入経路となり磯島取水口から下流では影響を受けることになる。さらに、下流に位置する天野川（淀川左岸）が生駒・有馬高槻活断層系による流出汚染物質を本川に流入させ、下流にある寝屋川市の出口取水口から下流の全ての取水口に影響を及ぼす。表5-2に示した流下時間は平均値であるため、淀川大堰に近くなる程さらに流下速度は遅くなる。汚染物質の流出の影響は非常に大きいと考えられる。

表5-5に示される汚染ポテンシャルと水利権量の関係を図5-6に示す。同図より、取水口が3つのグループに分けられることがわかる。この理由は、前述の淀川左右岸からの流入支川が存在するためである。磯島取水口(大阪府)では汚染の影響が大きく、柴島取水口(大阪市)では汚染を受ける可能性の高いことがわかる。

表 5-5 地震想定時に各取水口が影響を受ける可能性のある有害物質取り扱い施設数

取水施設		水利権量 (m ³ /s)	活断層系					
			花折	西山	生駒	上町	有馬高槻	六甲
上流 ↑ 取水口位置 (事業体) ↓ 下流	1. 楠葉取水口 (大阪市)	5.736	下水処理場(2) クリーニング(534) 化学工業(106) 鉄鋼業(31) 金属製品製造業(511) 一般機械製造業(459)	下水処理場(2) し尿処理場(2) 一般廃棄物処分場(2) クリーニング(98) 化学工業(20) 鉄鋼業(9) 金属製品製造業(106) 一般機械製造業(131)	影響無し	影響無し	下水処理場(2) し尿処理場(2) 一般廃棄物処分場(1) クリーニング(28) 化学工業(12) 鉄鋼業(8) 金属製品製造業(74) 一般機械製造業(90)	影響無し
	2. 磯島取水口 (大阪府)	20.915		下水処理場(4) し尿処理場(3) 一般廃棄物処分場(2) クリーニング(122) 化学工業(30) 鉄鋼業(15) 金属製品製造業(143) 一般機械製造業(170)	下水処理場(1) 一般廃棄物処分場(1) クリーニング(1) 化学工業(1) 金属製品製造業(2) 一般機械製造業(2)	下水処理場(4) し尿処理場(3) 一般廃棄物処分場(3) クリーニング(60) 化学工業(25) 鉄鋼業(16) 金属製品製造業(125) 一般機械製造業(143)		
	3. 磯島取水口 (枚方市)	1.505						
	4. 枚方市出口取水口 (寝屋川市)	0.160			下水処理場(4) し尿処理場(2) 一般廃棄物処分場(1) クリーニング(47) 化学工業(23) 鉄鋼業(12) 金属製品製造業(85) 一般機械製造業(84)	下水処理場(7) し尿処理場(4) 一般廃棄物処分場(3) クリーニング(117) 化学工業(64) 鉄鋼業(38) 金属製品製造業(272) 一般機械製造業(290)		
	5. 庭窪第2取水口 (大阪市)	7.139						
	6. 庭窪第1取水口 (大阪市)	3.059						
	7. 庭窪取水口 (大阪府)	2.500						
	8. 八雲取水口 (守口市)	0.722						
	9. 一津屋取水口 (1府4市合同)	6.171						
	10. 大道取水口 (阪神水道企業団)	8.746						
	11. 東淀川区菅原 取水口(吹田市)	0.350						
	12. 柴島取水口 (尼崎市)	0.471						
	13. 柴島取水口 (大阪市)	12.518						
	14. 柴島取水口 (阪神水道企業団)	4.318						

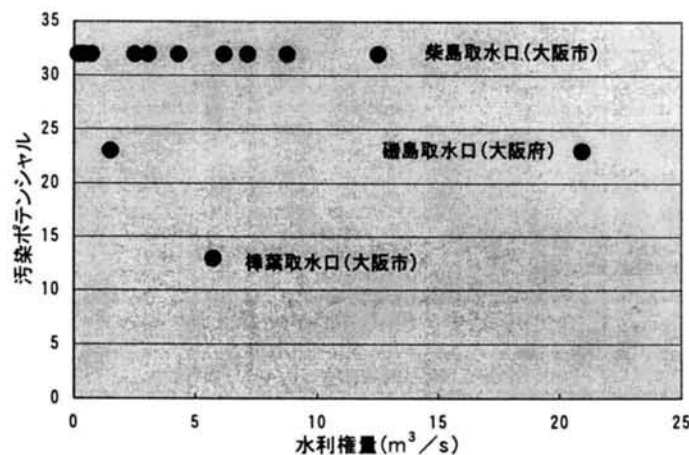


図 5-6 取水口の診断結果 (位置を特定できる汚染源データ)

5-4-3 都市活動への連鎖的な影響¹⁵⁾

第4章で示したように、震災ハザード上の水道施設、下水道施設、河川構造物が被災するため、淀川大都市域の多くの水道システムや下水道システムが機能を停止すると考えられる。さらに本章で述べたように、対象地域内の多くの有害物を扱う施設が被災することが予想され、有害物質を水道水源である淀川に流出する可能性がある。流出により水源が汚染された場合には、水道の取水を一時的に停止せざるを得ない。

これらの水循環システムが受ける被害により、第3章で示した都市活動に対して多大な影響を及ぼすことが予想される。この影響は、河川、水道、下水道が受ける直接的な被害だけでなく他のレイヤーの被災により波及的に影響が及ぶ内容もある。このような観点から、第3章から本章での分析の結果を相互の影響関係を考慮して整理すれば表5-6のとおりである。

同表に示す影響内容は、地震を発生させる活断層系によって異なる。対象地域の上流部に位置する活断層系の地震では、水源への影響が生じる。例えば、上流に位置する花折断層系の地震では、京都市内を中心に直接的な被害を受けるが、それだけでなく、有害物質の流出による水源汚染により、被災後数日間は下流の14箇所の水道取水に大きな影響を及ぼす。下流の都市活動は、水循環システムの施設に何ら支障を生じていないにも関わらず、水源汚染のために取水制限がかかり、給水制限や断水と言った事態に陥ることとなる。これらは、施設が受ける直接の影響とは異なる都市活動への間接的影響である。水道事業者が水源汚染に対して取水段階で適切に対応するならば、汚染物質が流下してしまう数日後には、通常の水供給が可能となる。この点が、何時になったら回復するかわからない渇水における給水制限や断水と異なる点である。

また、花折・有馬高槻・上町・六甲断層系は、淀川大都市域の都市活動の中枢部を震災ハザード内に含むため地震が昼間に発生した場合には、集積された都市活動施設と人的な被害が甚大となる。このような地域では、震災に備えて常住者でない都市生活者（通勤・通学者等）に対する飲料水などの水確保が重要となる。

さらに、都市機能が集積した地域では、断水と同時に電気・ガス等のライフラインも機能が停止する可能性が高い。特に、停電を伴う場合には多くの施設で自家発電機を稼働させるが、このためには冷却水が必要である。下水処理場やポンプ場では、停電時に断水している場合、自家発電施設の運転停止につながる場合もあることが指摘されている¹⁶⁾。

以上述べたように大都市域における震災の影響は連鎖的な構造を有している。防災・減災のためには、各レイヤーの管理者が水循環システムを構成する相互のレイヤーにおける予想被害状況とその影響について十分に認識しておくことが必要であり、その上で大都市域水循環システムとしての対策を講じる必要がある。

表 5-6 被災による水循環ネットワークと都市活動への連鎖的影響の構造

レイヤー	影響が生じるレイヤー			
	河川	水道	都市活動	下水道
原因となる事象が発生するレイヤー	河川	<ul style="list-style-type: none"> ・ 水道の取水施設の被災により取水困難となる可能性がある 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 治水機能の低下（洪水期に被災した場合には特に深刻である） ・ 淀川大堰等の流域における水循環システムをコントロールする施設が被災した場合の影響は治水・利水に深刻な影響を及ぼす 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 雨水放流の困難により内水被害が生じる可能性がある ・ 処理場からの処理水の放流が困難になると下水道処理場の機能維持にも支障をきたす可能性がある
	水道	<ul style="list-style-type: none"> ・ 堰の操作など河川管理施設において停電し、かつ断水した場合、冷却水の不足により自家発電機が稼動不可能となり、施設の機能が停止する可能性がある 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 水道断水により病院や水道水を多量に使用する工場をはじめ事務所など都市活動全般の機能を低下する ・ 水道断水による生活維持の困難（飲料水・トイレ用水等が確保できない） ・ 水道断水により消火栓の使用が困難となる可能性がある ※断水の影響は水道施設が被害を受けた場合と水源汚染が原因で取水を停止する場合がある 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 下水処理場やポンプ場が停電し、かつ断水した場合、冷却水の不足により自家発電機が稼動不可能となり、処理機能と揚水機能が停止する可能性がある
都市活動	<ul style="list-style-type: none"> ・ 工場等からの有害物質の流出による水城汚染 ・ 河川管理者自身の被災による対応の遅れ 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 有害物による水源汚染による取水停止（淀川本川下流域では流下時間が長い） ・ ためため被害が長期化・特に濁水時 ・ 水道管理者自身の被災による対応の遅れ 	<ul style="list-style-type: none"> ○一部地域に集中した都市生活者の被災により影響を拡大の恐れ ○木造家屋が多く水面積の少ない震災に弱い地域での被害拡大 ○有害物取り扱い施設の被災により有害物質が流出 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 下水処理場への流入量減少 ・ 下水道管理者自身の被災による対応の遅れ
	下水道	<ul style="list-style-type: none"> ・ 下水処理場からの未処理水により水城汚染があり、水城汚染をきたす ・ 合流管被災により汚水溢出による水城汚染が生じる可能性がある ・ ポンプ場の被災により治水機能へ影響が生じる 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 管渠（合流管、汚水管）の閉塞による道路等への汚水溢出の可能性が生じる ・ 汚水管閉塞によるトイレ使用の不可 	<ul style="list-style-type: none"> ○下水処理施設の被災により処理機能が停止・低下 ○汚水管・雨水管路の被災により下水の流入機能が停止・低下 ○合流管路の被災により下水・雨水の流入機能が停止・低下 ○ポンプ施設の被災により放流機能が停止・低下

注1) 対角成分（○印）は各レイヤーが直接受ける被害内容である。

5-5 結言

本章では、水道水源となっている淀川本川を対象として、震災想定時に水環境汚染の可能性のある有害物取り扱い施設の分布を把握すると共に有害物質の流出の影響について分析を行った。以下に結論を示す。

- (1) 淀川では過去に多くの水質事故が発生している。有害物質による水質事故が発生した場合、取水施設が集中する淀川下流部では、淀川大堰の堰上げのために流速が遅いため汚染の影響が平水時・低水時で 2～3 日間継続する。渇水時にはさらに長期化する可能性がある。そして、取水停止か大阪湾汚染防止かという深刻な問題に直面する可能性がある。
- (2) 平常時には多くの発生源が水源汚染の原因となるが、震災時には特に下水処理場、し尿処理場、工場、小規模工場・事業場（クリーニング店を含む）、一般・産業廃棄物最終処分場といった発生源を想定しておく必要がある。これら発生源からの汚染物質は、河川や地下に流入し、水道水源を汚染する可能性がある。
- (3) 対象地域における汚染要因（汚染発生源、汚染経路、汚染物質名）の構造を知るためには、取得可能データの様態（定量、定性、存在の有無）を考慮し、情報を捨象することのないよう調査を行う必要がある。本章ではその調査プロセスを提示し、汚染評価指標を決定した。
- (4) 震災時の汚染物質として、有機物、栄養塩類、重金属、揮発性有機化合物、油類、伝染性病原菌、環境ホルモンを考え、対象地域における汚染評価指標の分布を GIS を援用して把握した。発生源から河川への流出経路については地形図を利用する方法を提案し同法により推定した。
- (5) さらに、震災時を想定し、各水道取水に対し上流にはどれだけの有害物取り扱い施設が存在するかを汚染ポテンシャルとして明らかにし、水利権量の大きさと併せて取水口への影響を診断した。この結果、特に大阪府の磯島取水口（20.9m³/s）では汚染の影響が大きく、大阪市の柴島取水口（12.5m³/s）では汚染を受ける可能性の高いことがわかった。
- (6) 震災想定時の水循環ネットワークへの直接的影響（第 3 章・第 4 章にて説明）と本章で分析した水源汚染という間接的影響を併せて、河川レイヤー、水道レイヤー、都市活動レイヤー及び下水道レイヤーの相互には連鎖的な影響構造があることを指摘した。

【参考文献】

- 1) 大阪市水道局：水質試験所調査研究（報告）ならびに試験成績，1969～2000.
- 2) 淀川水質協議会：淀川流況調査業務報告書，2000.
- 3) 建設省近畿地方建設局：淀川水系淀川淀川大堰等工事中操作規則，1983.
- 4) 中瀬有祐・清水康生・萩原良巳・酒井彰：震災時を想定した大都市域水循環システムの総合的診断，環境システム研究，Vol.29，pp.339-345，2001.
- 5) 清水康生・萩原良巳：震災時を想定した大都市域水循環システムの再構成のための地

- 域分析，日本地域学会年次大会，pp.163-170，2001.
- 6) 日本地盤環境浄化推進協議会監修：土壌・地下水汚染の実態とその対策，オーム社，2000.
 - 7) 稲場紀久雄・国包章一・田中宏明・中村正久・酒井彰：環境ホルモナーその生活とのかかわりー，下水文化研究第12号，pp.141-176，下水文化研究会，1999.
 - 8) 環境庁：平成10年度PRTRパイロット事業調査報告書，1999.
 - 9) 酒井彰・清水康生：流域環境汚染リスク管理手法の提案とその適用方法に関する研究，公益信託下水道振興基金助成研究，2001.
 - 10) 吉川和広：土木計画のシステム分析，新体系土木工学，技報堂，1980.
 - 11) 岡田憲夫：災害のリスク分析的見方，「土と防災」講習会テキスト（土木学会土木構造物委員会編），pp.61-78，1985.
 - 12) 萩原良巳・清水康生：リスクマジメントのためのシステムズ・アナリシスの導入，京都大学防災研究所編・防災学ハンドブック，pp.337-340，2001.
 - 13) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告，ライフライン施設の被災と復旧，1997.
 - 14) 環境庁水質保全局：平成9年度土壌汚染調査・対策事例及び対応状況に関する調査結果の概要，1999.
 - 15) 清水康生・秋山智広・萩原良巳：都市域における人工系水循環モデルの構築に関する研究，環境システム研究，Vol.28，pp.277-284，2000.
 - 16) 社団法人日本下水道協会：下水道の地震対策マニュアル，1997.

第6章 震災リスク軽減のための広域水道システムに関する研究

6-1 緒言

第4章で述べたように、震災により水道施設は甚大な影響を受け、第5章で述べたように水源の汚染の発生により、淀川からの取水が困難となる事態が予想される。本章では、これらの状況を前提として水道システムで成し得る代替案について研究を行う。

震災時の被害形態には、事業体内でも直接被害区域・間接被害区域・給水影響区域があり、隣接する事業体も含めれば無被害区域も存在する。これら区域特性と水道の復旧過程及び都市生活者の必要とする用水の内容を時間軸上でシナリオとして設定する。すなわち、震災後の状況を混乱期（震災後3日間：期間1）、応急対策期（7日間：期間2）、復旧期（その後：期間3）と3つの期間に分けて考えるものとする。水源汚染が発生した時には汚染の継続が3日間は続くと考えられるため、その間は淀川からの取水が困難である。このため、被災していない水道事業体であっても他の被災事業体への水供給は困難となる。また、仮に送水が可能である事業体が存在しても、被災地では混乱期にあり他の事業体からの応援の水供給を受ける余裕はないものとする。このため本章では、期間2以降を対象として、水道システムにおいてどのような対策が有効であるかについて分析を行う。分析は、第3章で述べた対象区域内の6つの水道事業体（京都市水道、京都府水道、大阪市水道、大阪府水道、神戸市水道、阪神水道企業団）を対象とする。前章までの分析結果から、水道事業体の広域的な協力は、震災対策として重要であるため、事業体の行う対策は、連絡管と水道施設内貯留の整備であるとする。そこで、まず事業体間で全体提携が成立すると仮定し、各事業体の必要水量を確保しかつ連絡管の建設費を最小とする最適案を線形計画問題として定式化し分析を行う。さらに、個別事業体の立場から全体提携が成立する可能性についてゲーム理論を適用して考察を行う。なお、本研究では、対策を共同して行う事業体間に、その行動についての合意がある場合を提携と定義する。

6-2 震災想定時の時空間特性を考慮した連絡管ネットワークの構成

震災後のシナリオについて補遺に説明を示した。それらを要約すると、まず、阪神・淡路大震災の被害実態の整理を行い、それを踏まえて被災後の区域と期間を9つの場面として定義した。そして、2つの水道事業体の幹線管路を耐震化された水道管で相互に連絡し、何れかの事業体で震災による水量不足を生じた時に、他方の事業体が相手に水供給を行う。このような水道管を連絡管と定義した。ただし、連絡管を設置する水道事業体は、幹線管路の整備を行っているとは仮定している。各場面に対して水道施設の復旧状態の仮定を設け、その中で連絡管と水道施設内貯留の位置付けとして、期間1では施設内貯留のみが有効であり、期間2以降は連絡管が有効であることを述べた。この時、各場面で重要となる必要

用水は、期間1が飲料水・消防用水、期間2が飲料水・トイレ用水・復旧用水、期間3が飲料水等の生活用水と復旧用水であることを明らかとした。これら水利用を行う場所は、直接被害区域が避難所、間接被害区域が自宅と考える。また、対象地域の都市生活者数は、期間1では市区町村の昼間人口と夜間人口の多い方とし、期間2と期間3では夜間人口とした。以下では期間2以降の連絡管のネットワーク構成について述べる。

6-2-1 連絡管のネットワーク構成に際しての前提

(1) 必要水量の設定と不足水量の算出方法¹⁾²⁾³⁾

「必要水量」とは、各期間・各区域において都市生活者の生活維持のために最低限必要となる水量である。ある区域において事業体からの供給可能水量が必要水量に満たない時、足りない水量を「不足水量」とする。「余裕水量」とは、自区域へ供給した後に他区域へ水供給することのできる水量である。水量が不足するかもしれないか、また、そのどちらでもないかは、場面毎（活断層系・期間・区域毎）に異なる。不足水量の基準となる必要水量と余裕水量の基準を表6-1と表6-2に示す。

同表において飲料水の3リットル／人／日、飲料水・トイレ用水の20リットル／人／日、生活用水等の250リットル／人／日は都市生活者のもとに届くべき水量（有収水量ベース）であり、平常時給水量を基準にした復旧用水は供給者が送る水量（供給水量ベース）である。期間2における飲料水やトイレ用水は給水管等の破損によって水道管路によってではなく主に給水車・応急給水拠点から配られ、幹線管路を通じて送られる復旧用水とは供給ルートが異なる。期間3においても、同様のことがいえる。このため、必要水量として、これら基準の異なる値を加えることができると仮定する。また、期間2と期間3における直接被害区域の復旧用水は、復旧が始まってから通水率がほぼ100％に近くなるまで平常時の5割の給水量が必要と考える⁴⁾。給水影響区域は、被害区域を含むが給水区域内に機能している浄水場が存在している区域である。給水影響区域が他の区域に水供給できる許容限度は平常時給水量の3割までとし、同区域はこの水量の範囲内で他の区域へ送水できると仮定する。これは、渇水時の限界節水率がほぼ30％程度であることを根拠に設定した¹⁾²⁾。

表 6-1 必要水量の基準

	期間1	期間2	期間3
直接被害区域	3リットル／人／日 ×都市生活者数 (飲料水) ※施設内貯留で確保することしかできない	20リットル／人／日 ×都市生活者数（飲料水・ トイレ用水） + 平常時1日給水量の50% (復旧用水)	250リットル／人／日 ×都市生活者数（生活用 水等） + 平常時1日給水量の50% (復旧用水)
間接被害区域 給水影響区域	3リットル／人／日 ×都市生活者数 (飲料水)	20リットル／人／日 ×都市生活者数（飲料水・ トイレ用水）	250リットル／人／日 ×都市生活者数（生活用 水等）

表 6-2 余裕水量の基準

	期間 1	期間 2	期間 3
給水影響区域	平常時 1 日平均給水量の 7 割（供給許容限度は 3 割）		
無被害区域	平常時 1 日平均給水量		

ただし、機能している浄水場があるからといって、必ずしも余裕水量が発生するとは限らない。場合によっては供給可能水量が必要水量を下回ることも考えられる。したがって、給水影響区域では、供給可能水量が必要水量以下となる場合、余裕水量以上となる場合及び必要水量以上ではあるが余裕水量以下である場合の 3 つの状況が想定される。また、無被害区域では、平常時 1 日平均給水量以上の水供給能力を余裕分と考える。この供給能力は浄水場の有する浄水能力と水利権量の小さい方を採用する。

(2) その他の前提条件

①水道用水供給事業体の供給区域における市町村水道事業体の管理する浄水場の扱い

市町村の水道事業体は、水道用水供給事業体から受水した水を他の事業体に送水することはないと仮定する。

②対象とする水道事業体の地下水取水の扱い

地下水は、対象とする 6 つの事業体が取水している分に関しては水源能力であるとして与件とするが、水道用水供給事業体の供給区域内の市町村が独自に取水している地下水は考慮しないものとする。また、地下水を水源としている浄水場からの水量は、安定性が高く災害時にその利用が重要となる反面、地下水汚染の可能性もある。この地下水汚染については、期間 3 の終了以降の平常時に表出すると考える。従って、本研究では、分析の対象としないものとする。

③阪神水道企業団と神戸市の供給可能水量の扱い

神戸市と阪神水道企業団（神戸市を除いた尼崎市・西宮市・芦屋市）の有する供給可能水量は、阪神水道企業団の猪名川・尼崎・甲山浄水場の各浄水能力を平常時の神戸市と他の 3 市への給水量の比で割り振ることとする。ただし、各浄水場が個別に被災する場合には、その状況を考慮して各浄水場からの供給先と供給可能水量を設定する。

④直接被害区域への水供給

給水区域内に直接被害区域が存在し、かつ平常時に同区域へ送水していた給水影響区域が存在する場合、事業体はこの給水影響区域から直接被害区域への送水を優先して行うとする。すなわち、復旧は被災した事業体が自分の給水区域内の上流側の管路から順次進めると考える。このような給水影響区域が存在しない場合には、同じ給水区域内の間接被害区域からの送水や他の事業体からの送水(連絡管)を考えるものとする。

⑤区域分類についての仮定

大阪府営水道は、村野浄水場、庭窪浄水場、三島浄水場が水供給を行っているが、庭窪浄水場の供給区域が必ずしも明確でなく村野浄水場と多点注入を行っている。村野浄水場

は、全供給量の約 80% を供給しているが、生駒断層系地震や有馬高槻断層系地震を想定した時には震度 7 の直接被害区域に含まれ機能しなくなる。しかし、庭窪浄水場は直接被害を免れる。このような時、各浄水場の供給区域を明確にしておく必要がある。そこで、複数の浄水場から水供給を受ける都市は、その中で最も受水量の多い浄水場の供給区域であると仮定する。具体的には、庭窪浄水場の供給区域を守口市・門真市・東大阪市及び八尾市と仮定し、他の都市は村野浄水場の供給区域とみなした。なお、兵庫県営水道からの水供給（神戸市・尼崎市・西宮市）については、水量が小さいため考慮しないものとした。

6-2-2 連絡管の設置場所

(1) 設置場所の考え方

水道事業体間の連絡管の設置場所については、関西水道事業研究会が「市民の視点に立った水道地震被害予測及び震災時用連絡管整備に関する一考察」⁹⁾において具体的に複数の箇所を抽出している。同報告書では、連絡管の工事施工性、相互の給水区域内の幹線管路との接続性及び水圧確保の容易さ等の観点から連絡管の位置が検討されている。しかし、同報告書では、活断層地震を想定した震度分布を考慮していない。そこで本研究では、抽出されている連絡管の設置場所を基本として以下の考え方で場所を絞り込むものとする。

- ①区域の被災状態と被災後の時期から連絡管の設置が有効となる場所とする
- ②できるだけ震度 7 区域を避け、同じ事業体間を連絡する複数の連絡管候補がある場合には距離の短いルートを選定する
- ③研究会報告では、隣接する事業体として大阪府営水道と阪神水道企業団の連絡ルートが想定されていないため、上述の考え方より連絡管ルートを決定する
- ④阪神水道企業団と神戸市水道の連絡管は既設管を利用する（建設費用は見込まない）

(2) 連絡管の設置場所

水道施設の状態と各区域の必要用水より、各期間において区域間を連絡する連絡管の有効性を以下のように判断する。

①期間 2 における連絡管

非常に有効：間接被害区域と給水影響区域または間接被害区域と無被害区域が隣接する場合には、両区域間に連絡管を設けることが非常に有効である。

有効：直接被害区域への復旧が開始される時期であるので、直接被害区域と給水影響区域、直接被害区域と無被害区域との連絡は有効となる。給水影響区域同士や無被害区域同士が隣接している場合には、直接被害区域または間接被害区域へ送水するための中継として利用できるならば有効である。

②期間 3 における連絡管

非常に有効：直接被害区域の復旧が本格的に開始される時期であり、直接被害区域と給水影響区域、直接被害区域と無被害区域との連絡が非常に有効である。

有効：間接被害区域は既に水供給が確保されているため間接被害区域と直接被害区域を

結ぶ連絡管も有効である。また、給水影響区域や無被害区域同士の連絡も中継として有効である。

以上より、連絡管の設置場所として図 6-1 に示す 9 箇所を選定した。

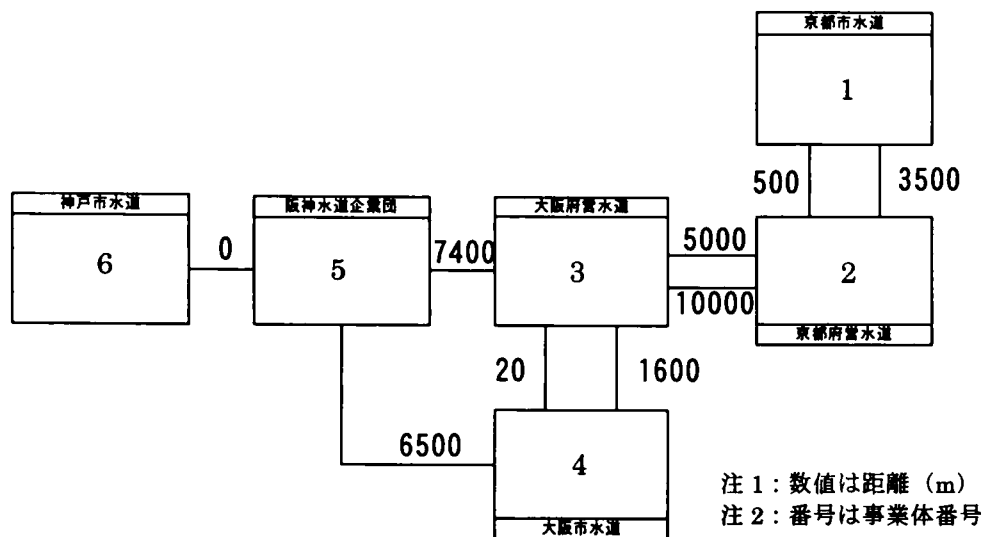


図 6-1 連絡管の設置場所

6-3 全水道事業体による最適連絡管ネットワーク

6-3-1 全体提携の論理

期間と設置されている区域の特性により連絡管の有効性は異なる。従って、連絡管は各場面においてできるだけ有効に利用されるよう設置を計画する必要がある。

活断層系による地震の被害は広域に及び単独の事業体で講じる対策は有効でない。また、主要な水道事業体（京都市水道・京都府営水道・大阪府営水道・大阪市水道・阪神水道企業団・神戸市水道）は、何れかの活断層系の影響を受けることが明らかである。活断層系による地震は同時には発生しないと仮定しているため相互に協力して広域的な対策を講じることが有効である。このような理由から、各事業体は総論としては全体提携に賛成の立場を取ると考える。

全体が提携するとなれば、水道連絡管の建設は最も有効な対策となる。水道事業体は、水利用者である都市生活者への負担を軽減するために各事業体が単独で行う施設内貯留施設の整備と併せて建設費用が最小となるよう代替案を作成すると考える。

6-3-2 全体提携モデルの定式化

(1) 各水道事業体の必要水量に関する条件

各水道事業体が満足しなければならない必要水量に関する条件は、活断層系と期間によって異なる。また、被災した水道事業体の給水区域内は、直接被害区域、間接被害区域及

び給水影響区域に分けられる。活断層系 k 、期間 t における区域 p の必要水量に関する制約条件は、以下のように記述される。

$$a_p^{kt} - b_p^{kt} - b_p'^{kt} \leq 0 \quad (6.1)$$

a_p^{kt} : 区域 p における必要水量

b_p^{kt} : 浄水場から区域 p への送水可能水量

$b_p'^{kt}$: 震災対策を講じることによる区域 p への供給可能水量の増分

ここでの区域 p は活断層系ごとに異なった区域区分となる。 b_p^{kt} は、浄水場の能力と水利権量の小さい方に相当する送水量である。 $b_p'^{kt}$ は式 (6.2) に示すよう連絡管による他の区域からの送水量と施設内貯留によって得られる水量の合計である。

$$b_p'^{kt} = b_{p1}'^{kt} + b_{p2}'^{kt} \quad (6.2)$$

$b_{p1}'^{kt}$: 水道連絡管によって他の区域から供給される水量（送水する場合は負）

$b_{p2}'^{kt}$: 施設内貯留施設により確保される水量（補給がない場合、期間 1 のみ利用可能）

水道事業体の全ての区域で式 (6.1) が満たされることが望ましい。しかし、全体提携の場合でも送水可能水量が必要水量に対して少ない時、この条件を満たすことができない状況もあり得る。このような場合には、必要水量を満足するよう対象区域を拡大し、より広域的な連絡管整備を行う必要がある。

次に、他の区域へ送水可能な区域である条件は以下の式 (6.3) で、また、その送水可能水量は式 (6.4) のとおりである。

$$b_p^{kt} - a_p'^{kt} > 0 \quad (6.3)$$

$$b_p^{kt} - a_p'^{kt} \quad (6.4)$$

$a_p'^{kt}$: 当該区域で確保しておく水量

a_p^{kt} の値は、表 6-2 に示した無被害区域では平常時 1 日平均給水量、給水影響区域では許容限度を考慮して同給水量の 7 割の水量として与えられる。これらをもとに、個別の活断層系を想定した区域が他の区域からの送水が必要なのか、他の区域への送水が可能なのか、もしくはそのどちらでもないのかに分類することができる。

活断層系 k の期間 t において、次式に示されるように区域 p で自ら供給可能な水量 b_p^{kt} が必要水量 a_p^{kt} を下回る区域では水量が不足し、他の区域からの水供給が必要となる。直接被害区域・間接被害区域はこの区域に相当する。

$$b_p^{kt} < a_p^{kt} \quad (6.5)$$

また、次式を満たす区域は連絡管（同じ事業体内では既設の幹線管路）によって他の区域へ送水可能であり、全ての無被害区域と一部の給水影響区域が相当する。

$$b_p^{ku} > a_p^{ku} \quad (6.6)$$

さらに、給水影響区域のなかには、式(6.5)と式(6.6)を共に満たさない場合も存在する。この区域は水量の不足も余裕もない区域ということになる。

他の区域からの送水量と施設内貯留によって得られる水量の総和 b_p^{ku} はこれまでに記した条件により、以下の範囲の値をとる。

1) $b_p^{ku} < a_p^{ku}$ のとき

$$b_p^{ku} = b_{p1}^{ku} + b_{p2}^{ku} \geq a_p^{ku} - b_p^{ku} > 0 \quad (6.7)$$

2) $a_p^{ku} \leq b_p^{ku} \leq a_p^{ku}$ のとき

$$b_p^{ku} = b_{p1}^{ku} - b_{p2}^{ku} = 0 \quad (6.8)$$

3) $b_p^{ku} > a_p^{ku}$ のとき

$$a_p^{ku} - b_p^{ku} \leq b_p^{ku} \leq 0 \quad (6.9)$$

(2) 制約条件の定式化

初期条件として与える連絡管および事業体内水移動の順方向（流向）を設定し、各事業体の不足・余裕水量をもとに全体の不足水量を解消するための制約条件を設定する。まず、活断層系 k における期間 t を考えたときの各連絡管を流れる水量を区域間の水移動ベクトル X^{kt} で表し、次式で与える。

$$X^{kt} = \begin{pmatrix} x_1^{kt} \\ x_2^{kt} \\ \vdots \\ x_M^{kt} \\ x_1'^{kt} \\ x_2'^{kt} \\ \vdots \\ x_N'^{kt} \end{pmatrix} \quad (6.10)$$

x_j^{kt} は連絡管 j を通る水量、 $x_{j'}^{kt}$ は事業体内の幹線管路 j' を通る水量を表し、 j ($j=1 \sim M$) と j' ($j'=1 \sim N$) は管の識別番号である。連絡管設置可能箇所は全部で M 箇所であり、当該場面において事業体内の異なる区域同士の水移動が可能な箇所が N 箇所であるとする。流量 x_j^{kt} と $x_{j'}^{kt}$ は順方向に水が流れる場合を正とし、逆方向に流れる場合を負とする。

活断層系 k の期間 t を考える際の管路の接続関係を示すマトリクスを式(6.11)で表す。

$$A^{kt} = \begin{pmatrix} A_{11}^{kt} & \cdots & A_{1K}^{kt} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{n1}^{kt} & \cdots & A_{nK}^{kt} \end{pmatrix} \quad (6.11)$$

A_{pj}^k は区域 p と連絡管 j （もしくは給水区域内の区域間を結ぶ幹線管路 j' ）との繋がりを表し、区域 p が連絡管 j の始点に接続しているとき -1 、終点に接続しているとき 1 、関係が無いとき 0 を与える。ここで n は当該場面が存在する区域の総数である。また、 K は $K=M+N$ であり、当該場面での区域間の水移動ベクトル X^k の次数に等しい。

式 (6.11) より区域 p が得る水量は次式となる。

$$b_p^k = \sum_{j=1}^M A_{pj}^k x_j^k + \sum_{j'=1}^N A_{pM+j'}^k x_{j'}^k + b_{p2}^k \quad (6.12)$$

なお、 b_p^k は、他の区域へ供給する場合には負の値となる。以上より、各区域の水収支に関する制約条件は、次式で表される。

$$b_{p1}^k + b_{p2}^k = \sum_{j=1}^M A_{pj}^k x_j^k + \sum_{j'=1}^N A_{pM+j'}^k x_{j'}^k + b_{p2}^k \geq h_p^k \quad (6.13)$$

ここで h_p^k は、区域の分類毎に次式で与えられる不足水量である。

$$b_p^k < a_p^k \text{ の時} \quad h_p^k = a_p^k - b_p^k \quad (6.14)$$

$$a_p^k \leq b_p^k \leq a_p'^k \text{ の時} \quad h_p^k = 0 \quad (6.15)$$

$$b_p^k > a_p'^k \text{ の時} \quad h_p^k = a_p'^k - b_p^k \quad (6.16)$$

上式により、各区域に対して h_p^k を下回らないように水量配分を行う。これを当該場面の全区域をまとめて表現すると、次式となる。ただし、 Y^k と H^k は b_{p2}^k と h_p^k の $(M+N)$ 項列ベクトルである。

$$A^k X^k + Y^k \geq H^k \quad (6.17)$$

また、期間 2 における直接被害区域への送水など、管路が一方方向にしか利用できないものについては、 x_j^k と $x_{j'}^k$ に非負制約を付ける。

$$x_j^k, x_{j'}^k \geq 0 \quad (6.18)$$

(3) 目的関数の定式化

目的関数 z は、連絡管の建設費用と施設内貯留施設の建設費用の合計として与えられ、これを最小化する。すなわち、連絡管の最大流量に対して、単位長さ当たりの費用を出力する関数を $c_j(|x_j^k|)$ とし、貯留容量 y_p^k に対して貯留施設の建設費用を出力する関数を $c_s(y_p^k)$ とすると目的関数は次式となる。

$$z = \sum_{j=1}^M c_j(|x_j^k|) l_j + \sum_{p=1}^n c_s(y_p^k) \rightarrow \min \quad (6.19)$$

l_j : 連絡管 j の延長

なお、最大流量に対する布設単価は一般的に規模の経済性があり、関数 $c_j(|x_j^k|)$ は非線型となる。このため流量規模別に以下のような線形近似を行う。

$$X^m \leq x_j^k \leq X^{m+1} \text{ のとき } c_j(|x_j^k|) = \alpha_m |x_j^k| + \beta_m \quad (6.20)$$

ここで、 m は流量規模を表し、 X^m, X^{m+1} は流量規模の下限と上限である。 α_m, β_m は流量規模 m のときに採用する定数である。この m は表 6-3 に示すように流量規模により 14 段階に分けた。表中の連絡管は、耐震型ダクタイル鋳鉄管とし、通水可能な最大流量は管内流速 $1.5\text{m}^3/\text{s}$ を仮定して求めた。

表 6-3 連絡管口径と布設単価

口径 (mm)	単価 (千円/m)	最大流量 (千 $\text{m}^3/\text{日}$)
500	250	25
600	290	37
700	340	50
800	380	65
900	420	82
1,000	470	102
1,100	548	123
1,200	634	147
1,350	788	186
1,500	941	229
1,600	1,028	261
1,650	1,084	277
1,800	1,260	330
2,000	1,519	407

(4) 複数の場面を考慮した解

対象としている場面を複数考慮した解を求める。不足水量に関する制約条件を個別の活断層系ごとに満たし、費用が最小となる解を求める。まず、各場面の提携案を重ね合わせて各連絡管の最大流量 x_j^* を定める。

$$x_j^* = \max_{k,j} |x_j^k| \quad (6.21)$$

これらの管路の中には単独の活断層系によって規定されるなど、既にこれ以下の流量とすることが困難な管路が含まれている。一方、口径を縮小することが可能な管路も存在する可能性がある。この費用軽減の余地のある連絡管の集合 S を定義する。また、この集合の中で延長距離の最も長い連絡管 L は次式で表される。

$$L = \{k \mid \max_{j \in S} l_j\} \quad (6.22)$$

この連絡管 L の最大流量 x_L^* を規定している場面 I を対象として以下に示す線形計画問題を

解くことにより、全体として更なる費用の軽減を図る。

[制約条件]

$$A^I X^I + Y^I \geq H^I \quad (6.23)$$

$$|x_j^I| \leq x_j^* \quad (j \notin S) \quad (6.24)$$

$$x_j^I, x_j^{II} \geq 0 \quad (\text{一方向利用の時}) \quad (6.25)$$

$$I = \{k, t \mid \max_{k,t} x_L^k\} \quad (6.26)$$

[目的関数]

$$z = \sum_{j \in S} c_j (|x_j^I|) l_j + \sum_{p=1}^n c_p (y_p^I) \rightarrow \min \quad (6.27)$$

この場面 I に対する線形計画問題の解が $S \neq \varnothing$ (空集合) であれば、式 (6.21) に戻って以上の計算を繰り返し、 $S = \varnothing$ となれば計算を終了する。この時の x_j^* が費用最小となる連絡管である。以上について、貯留項を除いた求解プロセスを図 6-2 に示す。

6-4 個別水道事業体の立場からの提携の可能性⁶⁾

6-4-1 個別水道事業体の論理

(1) 総論賛成に対する各論反対

前節では、全水道事業体が震災対策を講じることにより総論として賛成し、全体提携が成立すると仮定した場合の最適案を提示した。しかし、個別の水道事業体は、負担する費用によっては全体提携に参加しない場合も考えられる。このような、各論反対が起こりうる。一方、水道事業体が単独で対応しても、都市生活者の水確保が困難となる事態は避けなければならない。従って、事業体は代替案となる部分提携の成立が保証されている場合のみ、全体提携に参加しない。

水道事業体は、費用を考える前に震災時に生じる不足水量をなくすことを考える。これは、都市生活者を考えた震災対策として当然の行動である。しかし、水量の基準を満たす提携案が複数存在する場合、水道事業体は自らの負担費用が最小である案を選択する。

水道事業体は、上述の考え方で行動すると仮定し、全体提携と部分提携の成立について分析する。

(2) 提携に関する仮定

成立過程の分析では、共に不足水量(費用)が軽減する時のみ提携する場合と、片方の不足水量(費用)だけが軽減する場合にも提携が成り立つ場合の2通りを考える。前者が一般的な提携の条件であるのに対して、後者は関係する6つの事業体が協力して対策を講じようとする理念に基づいた場合の提携である。また、全体提携の論理(6-3-1項)では、

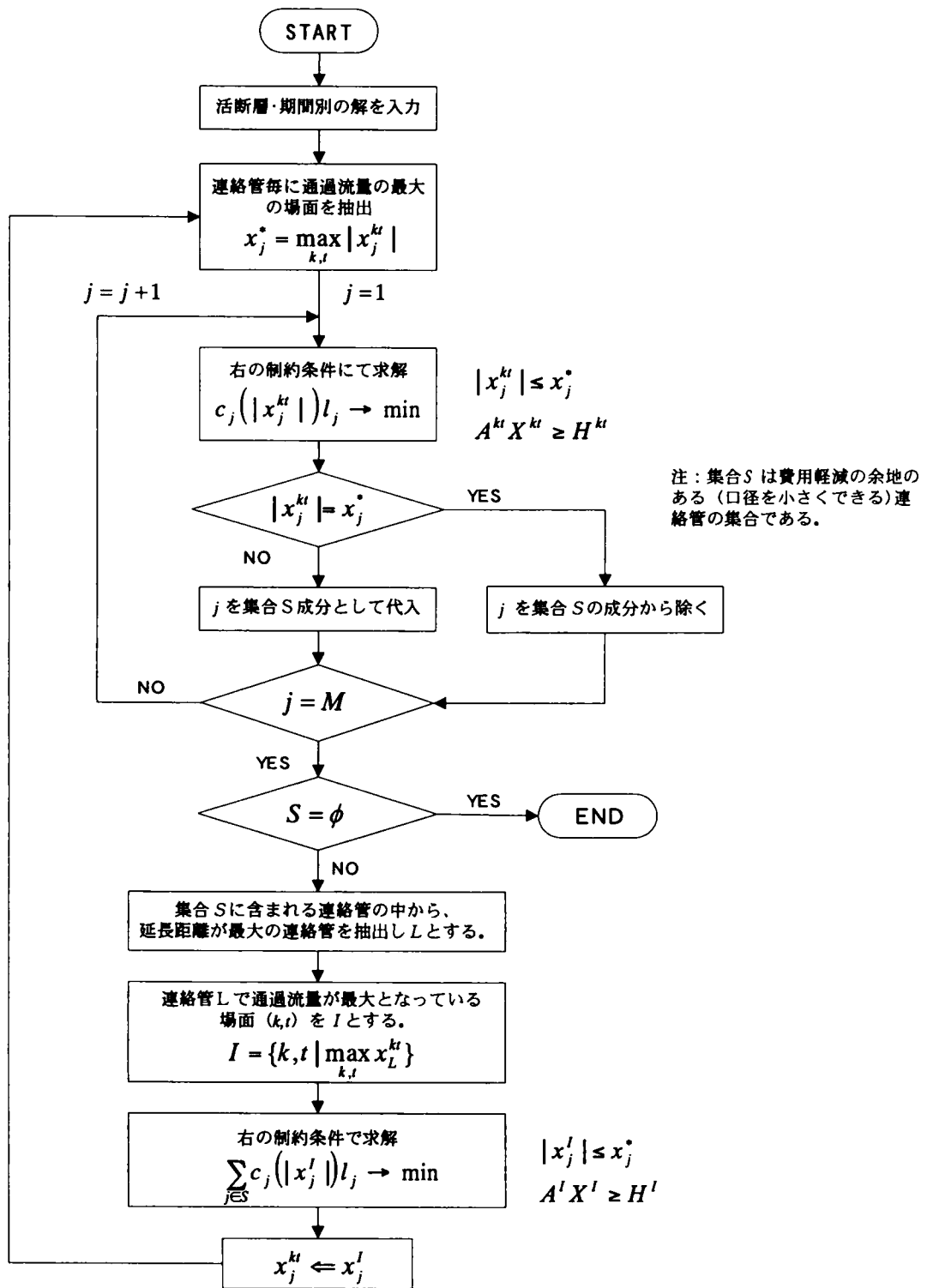


図 6-2 複数の場面（活断層系・期間）を考慮した最適案の求解プロセス

隣接しない事業体への送水も可能であるが、ここでは自分の事業体の近隣から提携の相手を探すと仮定し互いに隣接する事業体同士のみを許容提携とする。

このように仮定した上で、まず、水量の基準を満たすことのできる提携の成立過程を考察する。次いで費用負担までを考慮した場合の提携成立の可能性を分析する。

6-4-2 水量のみを考慮した提携モデル

提携した事業体の中に制約条件（必要水量）を満たさない区域（事業体）が存在するとき、その提携は制約条件を満たすべく他の事業体との更なる提携を望む。制約条件である必要水量の基準は最低限必要な水量であるため、これを満たさない提携の場合は、その提携に落ち着かず、必要水量が満たされるまでより大きな提携を望むと考える。すなわち、“提携 S が存在し、提携 S を構成する事業体のうち少なくとも 1 つが、提携 $T(S \cap T = \phi)$ の構成事業体によって 6 つの活断層系地震の想定時に現状より被害が軽減できる場合、提携 S は提携 $S \cup T$ になることを望む” とする。

この「提携」とは、連絡管整備による震災対策を共に行おうとする 6 つの水道事業体の部分集合である。空集合 ϕ 、ただ 1 つからなる集合および全体集合 N も提携と考える。提携 N を全体提携という。提携内の事業体の間では、いかなる対策（行動）をとるかにについての合意があると考え。すなわち、提携内ではさらに大きな提携になるかどうかの判断を構成事業体が共通認識として持っていると考え。

6-4-3 費用負担を考慮した提携モデル

水量のみを考慮した分析によって得られる成立する可能性のある提携を対象として分析を行う。

(1) 個人合理性

個人合理性の基準は、水道事業体が提携に参加するときに最初に判断する基準である。この基準は、水道事業体が他の事業体に費用の負担を頼らずに、単独で震災対策を計画する時の費用である。水道事業体は、負担する費用が個人合理的でないような提携には参加する動機がない。このことから、次式で表される提携 S は成立しない。ここに $C(S)$ は、費用関数であり、() 内の提携にかかる費用を表す。 i は単独提携である。

$$C(S) > \sum_{i \in S} C(i) \quad (6.28)$$

(2) 提携成立に関する条件

提携 S とそれを含む提携 $T(S \subset T)$ が“水量のみを考慮した提携の分析”において共に成立の可能性があると考えたとする。このとき、提携 S の構成事業体すべての負担費用が提携 T での負担費用を下回るとき、提携 S の構成事業体は提携 T の成立を拒み、提携 T は成立しない。

(3) 費用配分方法⁷⁾⁸⁾

費用配分方法としては、総費用均等分担法、残余均等配分法、残余比例配分法などの配分法がある。本研究では、提携によって連絡管ネットワークにおける当該事業体の位置や不足水量の相対的な大きさが異なるため、これらを考慮できる残余比例配分法を適用する。以下に同法を説明する。

まず、分離費用は、次式として定義される。

$$SC_i = C(N) - C(N - \{i\}) \quad (6.29)$$

$C(N)$ は費用関数であり、()内の提携全体にかかる費用を表す。 SC_i は全体提携に対する事業体*i*の分離費用である。これは、全体提携*N*から事業体*i*が抜けたときの費用減少量である。しかし、本研究においては、事業体が抜けることによって、連絡管整備ルートの変更や、必要水量の制約条件を満たさない場合が生じる。このような場合は、残った事業体の整備する連絡管が減少して整備費用が安くなる。残された事業体にとっては、必要水量を満たせないという好ましくない事態であるのに、安い費用として算出されてしまい、重要性の高い事業体の負担費用が高くなってしまう。また、必要水量を満たせないという効果の違う提携を考えて、費用を同様に捉えるのは問題である。ここで、そのような点を修正して分離費用を次式として定義する。

$$SC_i(S) = C(S) - C_{S-\{i\}}(S) \quad (6.30)$$

$SC_i(S)$ は、提携*S*を考えたときの事業体*i*の分離費用を表す。 $C(S)$ は提携*S*の最適案の総費用、 $C_{S-\{i\}}(S)$ は、費用負担をしない事業体*i*からの水供給を仮定して提携*S*内の*i*以外の事業体が行う最適案の総費用である。言い換えると、提携*S*において事業体*i*の必要水量の制約条件を考えない場合の費用ということになる。非分離費用は、次式で定義される。

$$NSC(S) = C(S) - \sum_{i \in S} SC_i(S) \quad (6.31)$$

$NSC(S)$ ：提携*S*について考えているときの非分離費用

また、提携*S*内で事業体*i*が自らの制約条件を満たすための費用を $C_i(S)$ とすると、事業体*i*の提携*S*における負担費用 $x_i(S)$ は、次式で表される。

$$x_i(S) = SC_i(S) + \frac{C_i(S) - SC_i(S)}{\sum_{j \in S} (C_j(S) - SC_j(S))} NSC(S) \quad (6.32)$$

以上の方法により、全体提携や部分提携における費用配分を求める。

6-5 対象地域における事例分析

6-5-1 全体提携を前提とした事業体の費用負担

各区域における期間別の不足水量と余裕水量を表 6-4 に示す。期間 1 の直接被害区域で

表 6-4 場面別（活断層系・期間・地域別）の不足水量

期間	事業体	花折断層			西山断層			有馬高槻断層			生駒断層			上町断層			六甲断層		
期間 1	京都市水道	直	間 (西部)	間 (南部)	給	直	給	直	給	直	無	無	無	無	無	無	無	無	無
		-3,624	-897	-539	606,584	-299	579,757	-55	369,628					369,628			369,628		
	京都府水道	無			給	直	給	直	無					無			無		
		29,978			64,477	-101	63,977	-95	29,978					29,978			29,978		
	大阪府水道	間			間 (西部)	直	間 (西部)	直	間 (西部)	直	間 (西部)	直	間 (南部)	直 (北部)	直 (南部)	無	無		
		-13,610			-13,492	-117	-2,877	-3,163	-4,127	-4,270	-5,213	1,197,822	-631	1,197,822	-1,202	535,797			
	大阪府水道	間			間		間		間					給	直	無	無		
		-11,820			-11,820		-11,820		-11,820					952,086	-6,283	914,482			
	阪神水道	間			間		間		間					間		給	直		
		-2,200			-2,200		-1,603	-597	-2,200					-2,200		808,989	-565		
期間 2	神戸市水道	給			給		直	給	給		給			給		直	給		
		221,013			221,013		-1,362	70,374	221,013					221,013		-3,468	107,781		
	京都市水道	直	間 (西部)	間 (南部)	給	直	給	直	無					無		無			
		-350,704	-5,698	-3,591	606,584	-25,456	579,757	-4,663	369,628					369,628			369,628		
	京都府水道	無			給	直	給	直	無					無		無			
		29,978			64,477	-6,006	63,977	-5,618	29,978					29,978			29,978		
	大阪府水道	無			給	直	給	直	給	間	直	間	直 (北部)	直 (南部)	直 (南部)	無	無		
		535,797			1,046,012	-7,583	184,359	-213,128	48,949	-281,831	-34,631	1,197,822	-44,995	1,197,822	-82,460	535,797			
	大阪府水道	無			給		給		給					給	直	無	無		
		914,482			919,137		919,137		919,137					952,086	-374,758	914,482			
期間 3	阪神水道	無			無		給	直	無					間		給	直		
		155,537			155,537		811,516	-42,435	155,537					-14,665		808,989	-40,420		
	神戸市水道	無			無		直	給	無					給		直	給		
		324,548			324,548		-89,900	53,814	324,548					197,751		-210,513	2,169		
	京都市水道	直	間 (西部)	間 (南部)	給	直	給	直	無					無		無	無		
		-476,829	-71,223	-44,888	606,584	-48,417	579,757	-8,870	369,628					369,628		369,628			
	京都府水道	無			給	直	給	直	無					無		無	無		
		29,978			64,477	-13,536	63,977	-12,790	29,978					29,978		29,978			
	大阪府水道	無			給	直	給	直	給	間	直	間	直 (北部)	直 (南部)	直 (南部)	無	無		
		535,797			1,046,012	-16,564	-30,018	-454,954	48,949	-605,243	-432,882	1,197,822	-93,373	1,197,822	-174,571	535,797			
期間 4	大阪府水道	無			無		無		給					給	直	無	無		
		914,482			914,482		914,482		919,137					952,086	-614,030	914,482			
	阪神水道	無			無		給	直	無					無		給	直		
		155,537			155,537		234,835	-88,186	155,537					155,537		232,308	-83,754		
	神戸市水道	無			無		直	給	無					無		直	給		
		324,548			324,548		-182,622	363,837	324,548					324,548		-427,633	578,850		

注 1：表中の「直」は直接被害区域、「間」は間接被害区域、「給」は給水影響区域、「無」は無被害区域を示す。

注 2：水量単位は m³/日。マイナスは不足水量を意味する。

注 3：網のかかった箇所は、給水影響区域だが許容限度供給量（70％）を満たさないため、間接被害区域の必要水量で評価した結果である。

注 4：期間 2以降で 2 重線に囲まれた場面では、事業体内で幹線管路が復旧するため不足水量を解消できることを示す。

は、前提としたとおり施設内貯留施設の整備によって対応する以外に対策はない。また、同表では間接被害区域の不足水量も示されているが、期間1の間接被害区域では、既設の配水池の貯留容量（計画1日最大給水量の12時間分）で飲料水分の必要水量の確保が可能である。同表に示される期間2以降の場面を対象として事業体の全体提携を仮定し、連絡管配置の最適化計算を行った結果を図6-3に示す。

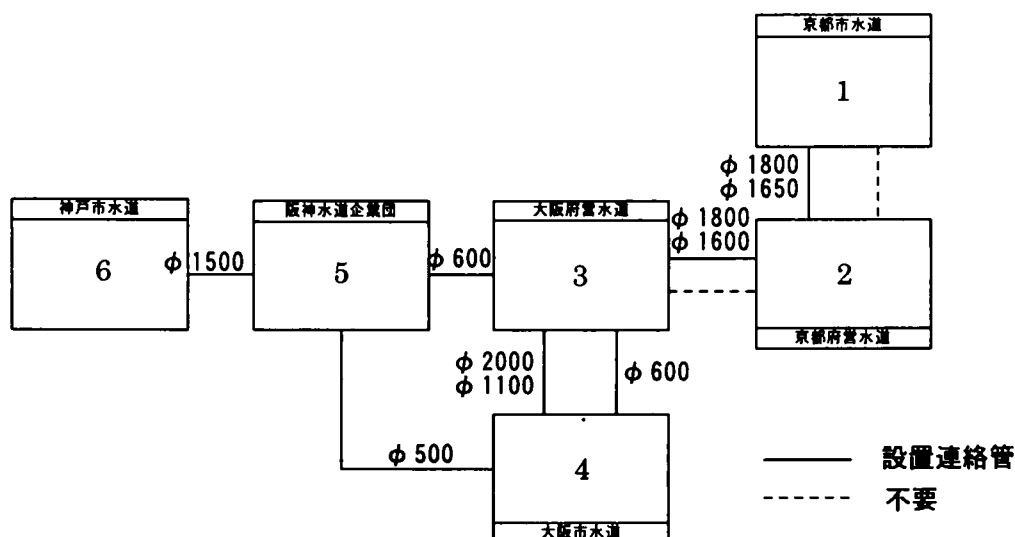


図 6-3 全体提携における最適案

同図より、全体提携を仮定して最適化を行った案は、全ての事業体が連絡管によって1つのネットワークとなることが分かった。この全体提携により、各事業体では何れの活断層系の地震に対しても不足水量は解消される。これは、水道事業体の全体提携に対する総論賛成の仮定を裏付けるものであり、水道事業体の連絡管の整備による全体提携が有効であることを示している。

また、連絡管による被害軽減が効果を示すのは期間2と期間3であり、期間1では水道施設内の貯留が有効で、個別の事業体が費用を出して対策することとなる。しかし、期間1における間接被害区域では期間2や期間3を想定して整備された連絡管を利用することができる場合があり（花折断層系による京都市など）、本研究で定めた必要水量の基準より大幅に余裕を持たせることのできる可能性もある。

6-5-2 事業体の立場を優先させた提携の可能性に関する分析

(1) 水量を考慮した分析

水量データを用いて提携の成立プロセスを整理した結果を表6-5に示す。数字は各事業体に対応している（1:京都市水道、2:京都府営水道、3:大阪府営水道、4:大阪市水道、5:阪神水道企業団、6:神戸市水道）。横軸の提携は、どの提携になる過程があるのかを示し、縦軸の提携は、どの提携からの成立過程が存在するかを示している。どちらの見方であっても、存在する場合に1をマークしている。また、前者が後者になることを望む条

表6-5 水量のみを考慮した水道事業体の提携の可能性に関する分析

	1	2	3	4	5	6	12	23	34	35	46	56	123	234	235	345	356	456	1234	1235	2345	2356	3456	12345	12356	23456	123456	
1																												
2																												
3																												
4																												
5																												
6																												
12																												
23																												
34																												
35																												
45																												
56																												
123																												
234																												
235																												
345																												
356																												
456																												
1234																												
1235																												
2345																												
2356																												
3456																												
12345																												
12356																												
23456																												
123456																												

注1：「1」は京都市水道、「2」は京都府営水道、「3」は大阪府営水道、「4」は大阪府営水道、「5」は阪神水道企業団、「6」は神戸市水道を示す。

注2：網掛けをした列の事業体は、行に示した提携を更に望むことを意味する。斜線は成立しない提携である。

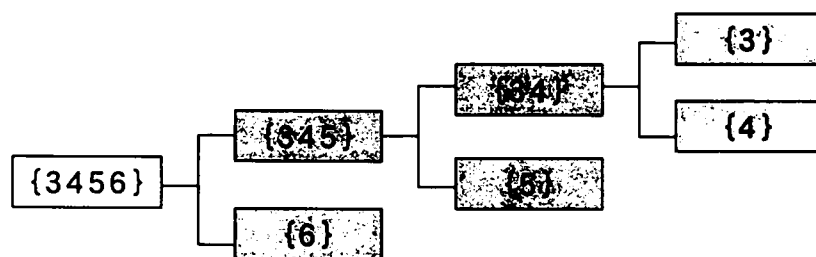
件を満たしているとき、1 のマークに網を掛けている。また、成立する過程の全てにおいて、互いに望まないため成立する可能性のない提携には斜線を引いている。

例えば、提携 {345} となる過程としては、{3} {45}、{4} {35}、{5} {34} の3通りがある。この {3} {45} は、互いに望まないため提携は成立せず、残りの {4} {35}、{5} {34} は、互いに望むため成立する。また、提携 {235} となる過程としては、{5} {23}、{2} {35} の2通りがある。前者は、互いに提携を望むが、後者は {35} が提携を望み {2} は望まないことを示している。

まとめると、表を縦に見たときはその提携が望む更に大きな提携を知ることができ、横に見ると、相手が望んでいるかを知ることができる。また、表を横に見たときは、その提携の成立過程における前段階を知ることができ、その提携が互いに望んで成立するのかどうかを知ることができる。

1) 両方が望むときに提携が成立するとき

この条件のもとで水量条件を満たして成立する提携は、{3456} のみである。この提携の成立過程上にあるすべての提携は、水量の条件を満たさないため、この提携になるまで落ち着くことはない。図 6-4 は、提携 {3456} に至る過程の 1 つを示したものである。ここでは、まず事業体 {3} と {4} が提携し、そこに {5}、{6} が順に加わるという成立過程になっている。提携 {3456} が成立するということは、{3} と {4} が互いに望んで提携し、{34} と {5} も同様に互いを必要とし、{345} と {6} もそうであるというように、存在する過程で連続的に成立条件を満たしていることを示している。



注：網掛けは改善されているが必要水量を満たしていない提携

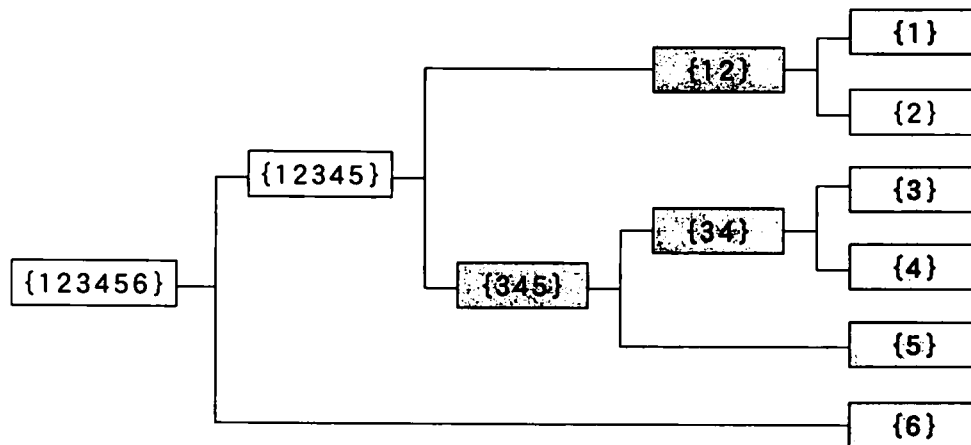
図 6-4 提携 {3456} の成立過程の 1 パターン

2) 片方が望めば提携が成立するとき

この成立条件は、片方が望めば提携することに合意する場合である。これは、困っている事業体があれば、自らのできる範囲で水供給を行い助けようとする考え方である。大都市域全体が提携する根本にはこの考えがある。

片方が望めば成立するという条件のもとで成立過程を分析すると、存在するどのようなルートをとっても全体提携が成立することが分かった。また、自らの提携内で必要水量の条件を満たし、これ以上の提携を求めない提携は、全体提携を除くと、{2} {3456} {12345} {23456} の 4 提携である。ただし、{23456} は、提携時の最適案を求めると、

京都府営水道と大阪府営水道との間の連絡管は繋がれないという結果になっており、実際には存在しない提携であるといえる。図 6-5 は、全体提携 {123456} の成立過程の 1 つである。この成立過程をたどると、まず、事業体 {2} は表 6-4 で明らかなように不足水量を生じないため提携の必要がない。しかし、{1} が {2} を必要としているために {12} が形成される。また、提携 {345} の成立過程は図 6-4 と同様であるが、互いに望んで提携が成り立っている。



※網掛けは改善されているが必要水量を満たしていない提携

図 6-5 全体提携 {123456} の成立過程の 1 パターン

提携 {12} と提携 {345} は互いに被害軽減することができるため、共に望む形で提携 {12345} が成立する。ここまでの部分は、提携 {12345} の成立過程でもある。提携 {12345} は、提携内で必要水量を満たすことのできる提携であり、他の事業体との更なる提携は必要としない。しかし、{6} が提携 {12345} を必要とするため、全体提携である {123456} が成立する。片方の事業体が望むと提携が成立するという条件では、どのような過程をたどっても、今回の事例では全体提携になることが分かった。

3) 分析結果についての考察

両方が提携を望むときに成立するという条件の場合は、京都府営水道が連絡管を必要としない事業体であるために、京都市水道が望んでも提携できない状況となる。また、大阪府営水道・大阪市水道・阪神水道企業団・神戸市水道はそれぞれ互いに望むため、提携 {3456} を形成する。このように、この条件では、自助努力では必要水量に満たない京都市水道がどの事業体との連絡管も整備できずに、孤立することになる。つまり、成立する提携構造として最も有力なのは ({1} {2} {3456}) であると考えられる。この内 {2} と {3456} は必要水量の基準を満たし、目標とする被害軽減を実現できることになる。

一方、片方だけが望むときにも提携が成立する条件の場合には全体提携が成立し、淀川大都市域の水道事業体全体が協力して連絡管整備に取り組もうとする動機が裏付けられた。全体提携が成立するときには京都府営水道は京都市水道と大阪府営水道との橋渡しの役割が強く、連絡管を必要としない事業体の参加が、広域的な連絡管整備には重要である。こ

の条件での分析において重要な意味を持つのは、他の如何なる提携も望むことのない提携である。結果でも示したが、{2} {3456} {12345} {23456} の 4 つである。{3456} や {12345} などは費用を考慮した際に申し合わせて全体提携 {123456} から抜け出そうとすることが考えられる提携である。したがって、全体提携の成立可能性は、これらの提携が鍵を握っているといえることができる。

(2) 費用を考慮した分析

3つの提携 {3456} {12345} {123456} について、残余比例配分法によって各事業体の費用負担を求めた結果を表 6-6 と表 6-7 に示す。

神戸市水道は、連絡管を必要とする場面があるが（有馬高槻・期間 2、六甲・期間 2）、阪神水道企業団との既設連絡管を利用するため、提携に参加しても費用負担はない。神戸市水道は提携{12345}には参加していないものの、他の 5 つの事業体にとって {12345} と {123456} の負担費用が等しいため、神戸市水道の参加を拒む理由はない。また、神戸市水道は、{3456}にも参加しているため、必要水量を満たせない状況は考えにくい。負担費用に差がないために、どの提携を成立させるかという話し合いには積極的に加わらない立場である。

大阪府営水道・大阪市水道・阪神水道企業団の 3 つの事業体は、対象事業体の中心部に位置するという位置的な優位性が働いたため、必要水量を満たす全ての提携に参加している。

京都市水道は、自らの必要水量を満たすためには、{12345}もしくは{123456}を成立させなければならない。しかし、大阪府営水道・大阪市水道は負担費用の低い{3456}を好むため、{12345}、{123456}の方が負担費用の低い阪神水道企業団を説得することが考えられる。同様に、大阪府営水道・大阪市水道もまた、阪神水道企業団が応じれば{3456}を成立させることができるため、阪神水道企業団の説得にかかることが考えられる。

このように、阪神水道企業団の立場は優位である。仮に、他の事業体の費用を余分に負担することによって自らの好む提携を成立させようという行動をとるとすると、大阪府営水道と大阪市水道は阪神水道企業団に 20 百万円を分担しあって支払えばよく、{12345}、{123456}よりも十分に低い費用で済む。しかし、京都市水道は大阪府営水道に 2,077 百万円、大阪市水道に 976 百万円あわせて 3,053 百万円を自らの負担に上乗せして支払わなければならない。このことから、京都市水道の立場の弱さが分かる。

以上の費用に施設内貯留の整備費用が加わる。これは期間 1 の直接被害区域における施設内貯留施設の費用である。耐震型貯留施設の容量当りの単価を平均的な整備費用である 60 百万円/100m³と仮定し、施設内貯留の整備費用を算定した結果を表 6-8 に示す。ここに示す施設内貯留施設の整備は、個別に事業体が行うものであり提携には関係しないが、連絡管の負担費用と比べて高い結果になっている。

表 6-6 提携の費用配分結果

単位：百万円

提携	事業体	分離費用	残余費用	非分離費用	負担費用
提携{3456}	大阪府水(3)	4,042	3,475	－	5,388
	大阪市水(4)	296	3,179	－	1,527
	阪神水道(5)	296	1,554	－	898
	神戸市水(6)	0	0	－	0
	計	4,634	8,208	3,179	7,813
提携{12345}	京都市水(1)	96	12,522	－	6,042
	京都府水(2)	0	0	－	0
	大阪府水(3)	500	14,668	－	7,465
	大阪市水(4)	1,625	1,850	－	2,503
	阪神水道(5)	0	1,850	－	878
	計	2,220	30,891	14,668	16,888
提携{123456}	京都市水(1)	96	12,522	－	6,042
	京都府水(2)	0	0	－	0
	大阪府水(3)	500	14,668	－	7,465
	大阪市水(4)	1,625	1,850	－	2,503
	阪神水道(5)	0	1,850	－	878
	神戸市水(6)	0	0	－	0
	計	2,220	30,891	14,668	16,888

表 6-7 提携の費用負担の比較（百万円）

事業体	{3456}	{12345}	{123456}
京都市水(1)	－	6,042	6,042
京都府水(2)	－	0	0
大阪府水(3)	5,388	7,465	7,465
大阪市水(4)	1,527	2,503	2,503
阪神水道(5)	898	878	878
神戸市水(6)	0	0	0

表 6-8 直接被害区域（期間 1）のための施設内貯留の整備にかかる費用

事業体	費用(百万円)
京都市水	7,149
京都府水	203
大阪府水	15,018
大阪市水	11,321
阪神水道	1,820
神戸市水	7,810

6-5-3 事業体の提携に関する総合的な考察

全体提携の成立を仮定した場合と水道事業体の論理を優先させた場合の提携について総合的に考察する。

①水道事業体の提携によって震災時の被害を軽減するためには、連絡管と施設内貯留の整備の両方が必要となる。施設内貯留が有効なのは期間 1 で、連絡管は期間 2 と期間 3 で有

効である。

②水量のみを考慮して提携の成立過程を分析する際に 2 通りの条件を定め、双方が望む場合と片方が望む場合の分析を行ったが、双方が望む場合のみに提携が成立する条件では、提携 {3456} にしか至らない。従って、総論賛成を仮定した全体提携による最適案は、個別事業体の論理を優先した場合には実現しない。一方、片方が望む場合に提携するとした場合には、全体提携は成立する。ただし、費用負担まで考慮した場合、個別事業体が費用最小化を優先すれば、部分提携のみが成立する。

③水道事業体の全体提携の成立は、部分提携 {3456} の構成事業体の選択に大きく依存している。個別の事業体が自らの費用最小化だけを優先すると京都市水道が孤立してしまう。この事態を回避するためには、互助の認識を共有することを動機として、困った事業体を積極的に助けるという提携の成立が不可欠である。

④期間 1 では、直接被害区域は施設内貯留の整備によってのみ対応可能であり、また、間接被害区域では配水池における貯留量によって飲料水は賄えるため、連絡管整備に関わらない区域である。しかし、期間 2 や期間 3 の必要水量を満たすために整備された連絡管は期間 1 でも利用できる場合が存在する。期間 1 の直接被害区域や間接被害区域では飲料水の確保のみを想定しているが、これらの理由により、期間 1 の間接被害区域では、連絡管の利用によって、より多くの水量を確保することができる。

⑤直接被害区域では、震災後に発生する火災に備えて消防用水が必要となるが、断水のため、消火栓が利用できない。本章の分析では、直接被害区域の消防用水は、必要水量として考慮していない。施設内貯留施設として整備することも考えられるが、消防用水としての大量の水は、水道事業体の貯留施設だけで確保することは難しい。従って、利用することのできる他の水源を考えておく必要がある。

6-6 結言

本章では、被害区域の特性と水道の復旧過程及び都市生活者の必要とする用水の内容を時間軸上でシナリオとして設定した。また、水道連絡管と水道の施設内貯留が対策として有効である場面について考察した。この結果、事業体間の提携が不可欠であることが明らかとなったが、提携を行っても水道事業体だけでは震災時に対応できる限界も存在することがわかった。本章の主要な結論は以下のとおりである。

- (1) 阪神・淡路大震災による、都市生活者の被害状況を整理した。それらを基に被災後の都市生活者の必要水量と水道施設の復旧状況を時間の経過と区域特性により 9 つの場面に分けて設定した。すなわち、被災後を、期間 1（混乱期）、期間 2（応急対策期）、期間 3（復旧期）に分け、被害区域を、直接被害区域、間接被害区域、給水影響区域に分けた。
- (2) 対象区域内の主要な水道事業体は、第 5 章までの分析により、全体提携する動機を有している。このため、全事業体が協力し合うという全体提携を仮定し、水道連絡管の最適

配置を線形計画問題として定式化した全体提携モデルを提示した。これは、水道事業体全体が協力することに総論として賛成した場合の代替案作成のためのモデルである。

(3) しかし、各水道事業体は、震災時の不足水量を解消したいと考えると共に、連絡管の建設費用を最小化したいと考えるはずである。このような事業体の論理をゲーム理論を適用した提携モデルとして定式化した。同モデルにより、事業体の論理を優先した時に全体提携が成立するか否かの考察を行った。

まず、水量のみを考慮して提携の成立過程を分析した。その際、提携の条件を2ケース想定した。すなわち、事業体同士が互いに望むときに提携が成立する場合と何れかの事業体が提携を望めば提携が成立すると仮定した場合である。前者の場合には、全体提携は成立せず、後者の場合には全体提携が成立することが確かめられた。ただし、費用負担までを考慮した場合、個別事業体が費用最小化を優先すれば全体提携よりも部分提携が成立することが明らかとなった。

(4) 期間1の直接被害区域では、連絡管の利用が困難であるため貯留施設の整備に頼らざるを得ない。震災後に発生する火災に備えて消防用水が必要となるが、水道管路の破損のため、消火栓が利用できない。本章の分析では、直接被害区域の消防用水を必要水量として考慮していない。施設内貯留施設として整備することも考えられるが、消火栓が利用できない状況下で消防用水を水道事業体だけで確保することは難しい。従って、消防用水として利用することのできる他水源を考えておく必要がある。このための水源として、都市域で豊富に存在する下水処理水を利用することが考えられる。

【参考文献】

- 1) 清水康生・萩原良巳・西澤常彦・渡辺晴彦：渇水時の限界節水率と給水マネジメントモデルに関する研究, 水文・水資源学会 2000 年研究発表会要旨集, pp.168-169, 2000.
- 2) 清水康生・萩原良巳・西澤常彦：都市域における渇水時の水利用構造評価モデルに関する研究, 京都大学防災研究所水資源研究センター研究報告第 20 号, pp.69-80, 2000.
- 3) 清水康生・萩原良巳・岩根知里：ライフスタイル概念に基づく水利用構造分析に関する考察, 環境システム研究, Vol.27, pp.81-88, 1999.
- 4) 小倉 晋：神戸市水道システムの復旧と復興—ライフライン機能向上にむけて—, 第 4 回水道管路国際シンポジウム, 1997.
- 5) 関西水道事業研究会：市民の視点に立った水道地震被害予測及び震災時用連絡管整備に関する一考察, 1996.
- 6) 鈴木光男：新ゲーム理論, 勁草書房, 1994.
- 7) 岡田憲夫・谷本圭志・榊原弘之：河川の環境保全を含む共同整備事業の費用配分制度に関する研究, 総合防災研究報告第 16 号, 京都大学防災研究所, 2001.
- 8) 阪本浩一・吉川和広・萩原良巳：大気汚染リスクを考慮した広域のごみ処理施設の費用配分に関するモデル分析, 環境システム研究 27, pp.17-24, 土木学会, 1999.

補遺 阪神・淡路大震災における被災地の水利用実態と復旧のシナリオ

1 被災地の水利用実態¹⁾²⁾

阪神・淡路大震災によって被災した都市生活者の被災地における水利用実態について家庭用水と都市活動用水に分けて整理を行う。

(1) 家庭用水

自宅で被災した後の生活の仕方は様々である。自宅で生活を続けた世帯、避難所に移って生活した世帯、さらに、被災直後から被災地以外の知人宅やホテルで暫くの間生活をしてきた被災者もいた。これらの中から自宅と避難所での生活者を対象として、どのような用途の水を必要としたか、どのような水源を利用したか等の水利用状況について、アンケート調査結果(日本水環境学会:「阪神・淡路大震災による水環境への影響と対策」報告書, 1997)を基に整理する。アンケートは、震度7区域を含む神戸市東灘区・中央区・長田区(4月29,30日)と芦屋市(3月4日・4月29,30日)において対面調査法で行われた。

1) 自宅生活者

被災後、生活の維持に必要なもので最も不足を感じたのは飲料水であった。震災後2ヶ月を経ても約2割の被災者が不足と答えている。震災後に停電などで混乱している時期の飲料水の確保方法としては市販水(ペットボトル)の利用が最も多く(約37%)、次いで給水車であった(約30%)。また、一部の世帯では、自宅の井戸を利用して飲料水を確保した(約7%)。震災直後の混乱期における水源毎の確保水量では、この井戸水が最も大きい水量となっている。震災後の混乱期では、市販水の利用割合が高いが、混乱期の後に応急対策が進むに従い、市販水でなく給水車からの水を利用する割合が高くなっていく。

水洗トイレは下水道施設が被災していなくとも水道が断水したため、多くの世帯で使用することが困難となった。このトイレ用水を震災直後に確保できた世帯は7割程度である。確保できた水源は風呂の残り湯などの再生水が最も多く2割以上である。次いで井戸水の利用があげられている。復旧が進むに従い、給水車からの水を利用している。一方、トイレ用水を確保できなかった世帯では、多くが仮設トイレや避難所のトイレなど自宅外のトイレを利用している。また、ゴミとしての排出、マンホールへの直接投入、川での処理など多様な対応がとられた。アンケート回答者の半数以上が水分補給や食事でトイレ利用を控える対策を行ったと答えている。

一方、風呂・洗濯は、被災直後の混乱期にはほとんど行われていない。風呂は、復旧が進んだ後でも自宅ではなく避難所の風呂を利用する割合が半数を超えている(芦屋市)。洗濯は、復旧が進んだ時期でも水場等の自宅外・コインランドリー・クリーニング店の利用が6割と多い。

2) 避難所生活者

自宅が全半壊するなどして住むことができなくなった被災者や、自宅は残っているが断水の期間中に避難所で生活した被災者も多い。このような、避難所は学校等に設けられた。

避難所での生活も、やはり最も不自由を感じたのは飲料水である。自宅生活者と比較して食料とトイレに対する不満が高くなっている。特に水洗トイレでは、詰まって使用不可能となったとの声が聞かれた（アンケート調査・新聞記事）。

避難所ではプール貯留水などをトイレ用水などの生活用水として利用したため、プールの貯留水が減少した。消防用水への不安も生じたため、避難所生活者から生活用水の確保の要望が県に寄せられ、県は業界の協力を得て散水車やミキサー車などを使って各避難所への給水を行った。

(2) 都市活動用水

被災した事務所ビルでは、建物の倒壊や損傷により業務の再開に長期間を要した。その間、被災地では平常時の都市活動が行われていない。このような状況の中で被災直後から活動しているのは救護活動に当たった病院や貴重な水や食料の供給が可能であった被災を免れた数少ない小売店である。

1) 病院

震災直後は給水車両の不足から公立病院を中心とした給水が行われた。しかし、病院では人工透析などの医療用水が不足した。このため、病院からの要望が有り次第給水を行うという体制で給水が行われた。前年に大渇水であった香川県などから送られてきたポリタンクに浄水場などで水詰めを行い医療機関に給水を行った。その後、自衛隊の給水車や各水道事業体の給水車を病院専用として、病院の高架水槽などへ直接送水することで医療用水が確保された。また、人工透析患者の中には、人工透析用の水が確保できないために被災地外(大阪府など)の病院まで救急車で搬送された者もいた。

病院は平常時でも大口の水需要者であり一般的に受水槽も大容量のものを保有している。しかし、被災時には水道が断水し、かつ非常に多くの患者が集中したために水は平常時以上に必要であったことが想定できる。このような状況に対して上述のような混乱が生じたと解釈できる。

2) 小売店

水道が断水したため、都市生活者は飲料水源を市販水（ペットボトル）のような代替水源に求めた。しかし、その供給元の小売店も多くの被害を受けた（調査では建物への影響のない店舗は 1/4 であった）。しかし、被害を受けた小売店の営業再開日は半数以上が地震当日に営業を開始している。この中には全壊や半壊の店舗も含まれる。この理由は、生活のための他、飲食料品を求める住民の要望やコンビニエンスストア直営店では本社指示などがあった。その商品販売状況は、震災後 1 週間以内は、入荷と同時に売り切れという店が多かった。

2 震災時を想定した被害状況と復旧のシナリオ

震災被害は、時間的・空間的に発生状況が異なる。以下では、まず空間的な区分について述べ、次いで各区域において被災後に必要となる水確保の状況を時間経過に沿って期

間として区分する。その後に水道事業体の対応の経過について述べる。

(1) 区域の分類

被災した水道事業体の給水区域を次の3つの区分に分類して考える。

○直接被害区域：震度7が想定される区域で、水道施設（管路、浄水場等）の機能が停止する区域である。

○間接被害区域：震度7ではない区域で、水道施設の直接被害はないが、取水施設や浄水場など導水・送水ルートの上流部で施設が被災したために水供給が停止する区域である。

○給水影響区域：震度7ではない区域で浄水場からの給水も受けることが可能であるが、同じ給水区域内に直接被害区域が存在するため、復旧用水などを確保するため給水量の制限が行われる区域である。

(2) 被災後の期間の分類

都市生活者の被害実態をもとに地震発生から後の期間を以下に示す3期間に分けて考えるものとする。

○期間1（混乱期）：震災後、水道担当者自身も被災し、限られた担当者が被害実態の把握を行っており、応急対策まで組織的に行うことができない混乱している時期である。水道管路の復旧や応急給水拠点（仮設水道）の設置は行われておらず、水道管によって都市生活者に給水することは実質的に不可能である。水道事業体が直接被害区域の都市生活者のために講じることのできる対策は、施設内貯留水の利用が中心となる。間接被害区域でも貯留水の利用が中心である。このような期間として被災後の3日間を想定する。

○期間2（応急対策期）：地震発生直後の混乱が落ち着き、水道事業体の応急対策として、給水拠点の設置が進み、給水車による給水が整いつつある期間である。都市生活者の水に対する欲求も次第に高まる時期である。この期間として7日間を想定する。

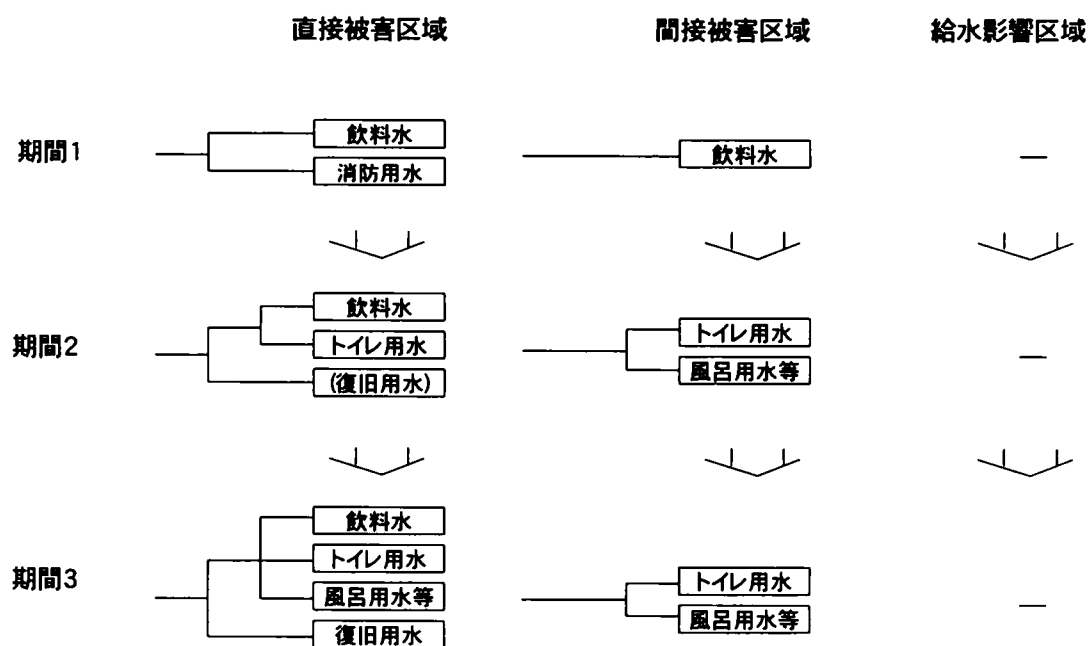
○期間3（復旧期）：水道管路の復旧が本格的に行われ、管路の修復が終わった区域では随時、通水されるようになり、地震発生後、最も多くの水道水が使用される期間である。この期間では、生活用水と復旧用水の両方が必要となるため、平常時を上回る水量が必要となる。

(3) 都市生活者の必要水量と水道施設の状態に関する仮定

前述の被害実態から各場面において、自区域外からの補給が特に必要になると考えられる用水を補遺図6-1に示す。

上述の区域と期間の分類を踏まえ水道施設の状況と復旧レベルを補遺表6-1のとおり仮定する^{3)~6)}。

補遺表6-1中の「幹線管路」とは、水道事業体が管理する管路の内、導水管及び送水管に加え、主要な配水管と定義する。直接被害区域においてはこの幹線管路と、その先にある水道管も被害を受けて機能しなくなる。幹線管路は前述の「期間2」より復旧が始まり、「期間3」の期首では復旧が完了し機能すると考える。



補遺図 6-1 自区域外からの補給が必要となる用水の時間的な変化

補遺表 6-1 各期間における水道施設の状態に関する仮定

	期間 1（3日間）	期間 2（7日間）	期間 3（以降）
直接被害区域	<ul style="list-style-type: none"> ●浄水場と幹線管路等の水道施設は全て機能しない。 ●耐震化された施設内貯留施設は機能し水供給が可能である。 	<ul style="list-style-type: none"> ●浄水場は機能しない。 ●幹線管路は復旧が始まり、期間 2 の末には機能を取り戻す。 ●施設内貯留施設では補給を必要とする（補給がなければ機能しない）。 	<ul style="list-style-type: none"> ●浄水場は機能を始める。 ●幹線管路は機能を取り戻す。
間接被害区域	<ul style="list-style-type: none"> ●施設は機能する。 ●しかし、上流からの水供給が絶たれるため、区域内への水供給は不可能である。 ●施設内貯留施設は機能し、水供給が可能である。 	<ul style="list-style-type: none"> ●施設は機能する。 ●施設内貯留施設では補給を必要とする（補給がなければ機能しない）。 	<ul style="list-style-type: none"> ●施設は機能する。
給水影響区域	<ul style="list-style-type: none"> ●施設は機能する。 ●しかし、水源汚染が生じている場合は、取水停止により水供給は不可能となる。 ●施設内貯留施設は機能し、水供給が可能である。 	<ul style="list-style-type: none"> ●施設は機能する。 	<ul style="list-style-type: none"> ●施設は機能する。

また、「施設内貯留施設」とは、耐震化された貯留施設である。直接被害区域の期間 1 では、浄水場と幹線管路が全て使用できなくなる。これは阪神・淡路大震災時の実態を踏まえての仮定であるが、区域内の消火栓も使用不能になるという消防の立場からは非常に厳しい状況を仮定していることになる。

(4) 研究対象とする対策

水道事業体の講じる震災対策は、単独事業体で可能な対策と他の事業体と協力して行わなければならない対策に分けられる。単独で可能な対策としては、水道施設全般の耐震化、水道施設による貯留施設の整備（施設内貯留）、地下水やダム開発により水源を新たに確保する水源の複数化がある。水源開発に関しては一般的には代替案となるが、小規模な地下水開発を除けば、淀川大都市域では既に完了した琵琶湖総合開発をはじめ幾つかのダム開発も着手済みである。新規の開発は、現実的ではないため代替案からは除くものとする。

また、他の水道事業体と協力して行う対策として、震災時に連絡管を利用した水供給を行うことが考えられる。以上より、水道事業体の対策案は大きく次の3つに分類される。

①給水区域内の浄水場や水道管路など水道施設の耐震化

②施設内貯留施設の整備

③水道事業体間の連絡管整備

これら対策案の位置付けを説明する。水道施設の耐震化は被害の防止・軽減を図るためのものである。しかし、全ての水道施設を耐震化することは現実的に不可能であり、仮に耐震化してもそれらが被災しないと仮定するのは危険である。本研究は、構想計画としての視点から流域レベルで水道施設をとらえている。耐震化については、都市レベル（urban level）や都市生活者レベル（residential level）の空間スケールでは考慮すべきであり、個別施設に対して評価が必要であるが、流域レベルでは、個別の施設に対してその評価を行うことは困難であり意味がないと考える。このため、対策として講じる施設を除き水道施設は、耐震化の有無にかかわらず震度7区域内で被災したならば機能を停止すると仮定する。従って、本モデルの中では耐震化対策は取り上げないものとする。

施設内貯留施設の整備は、第3章で述べたように都市域で水道供給以外に水確保の手段が存在しない地域では必要性が特に高い。本研究では、通常の施設整備としてではなく震災対策として重要な施設と考える。この施設は直接被害区域で必要となり、各事業体が独自に行い得る対策である。貯留した用水の利用用途としては、水質の保証された少量の限られた水量であることから飲料水として利用されると考え、期間1の3日間分の容量を確保すると仮定する。

第4章で述べたように震災の特性が広域性にあることから、その対策はより広域であることが有効である。この理由から連絡管は、震災対策として重要であると考えられる。

以上より、水道事業体の対策として、施設内貯留施設と連絡管の整備を代替案として取り上げるものとする。

(5) 水道連絡管の定義

2つの水道事業体の幹線管路を耐震化された水道管で相互に連絡し、何れかの事業体で震災による水量不足を生じた時に、他方の事業体が相手に水供給を行う。このような水道管を連絡管と定義する。ただし、連絡管を設置する水道事業者は、連絡管を接続する給水区域内の幹線管路の整備を既に行っていると仮定する。

以上より、水道連絡管は平常時においても給水区域内の幹線管路の一部と位置付けて水供給を行うことが可能である。事業体は、このように連絡管を配水管網計画の中で位置付けた上で管路の整備を行っておく必要がある。水供給を行う相手の水道事業体との間に他の水道事業体の給水区域が存在する場合でも、その区域に給水を行う分水協定を結んでおけば良い。水道用水供給事業体においても同様に考えることができる。連絡管による対策では、平常時には幹線管路として利用し、震災時には連絡管として利用するという、平常時と震災時の水利用の連続性を確保するものとする。

連絡管の維持管理についても上記の位置付けの基に通常の幹線管路と同様とする。

(6) 水源汚染に関する仮定

第5章で述べたように、対象地域には有害物質を取り扱う施設が数多く分布しており、震災時には水道水源である淀川に有害物質が流出する可能性がある。本章では、これらの施設からの有害物質の流出を仮定し、表5-5に示した取水口を持つ水道事業体は、水源からの取水が被災後の3日間（期間1）困難になると仮定する。

(7) 都市生活者の人数

第3章で述べたように都市生活者の人口は、昼夜間で大きく異なる地域が存在する。このため、期間1の都市生活者数は、市区町村単位で昼間人口と夜間人口の多い方とし、期間2と期間3については、夜間人口（常住人口）と考える。

(8) 水道連絡管と施設内貯留施設の対策としての位置付け

以上の仮定を基に、水確保の対策を整理した結果を補遺表6-2に示す。同表に記載した内容に対する根拠については以下に示す。なお、同表に示す水利用の場所は、直接被害区域が避難所（接続する箇所が下水管渠が被災しておらず、かつ仮設トイレが設置されている）、間接被害区域が自宅である。

1) 阪神・淡路大震災では、長田区など木造家屋が集中していた場所で大規模な火災が発生した。地震発生直後の消火は、人命を守る緊急対応として最重要な事項である⁷⁾。直接被害区域でこのような火災が発生する恐れが高いと考える。

2) 消防水利としての要件を満たすためには所定の水源能力が必要であり⁸⁾、平常時には水道管に接続された消火栓が利用できるが、直接被害区域では断水状態が想定されるため、防火水槽がまず利用される。阪神・淡路大震災における消防活動の記録によれば⁷⁾、それでも足りない場合は、プール水や河川水などを水源とした例が多くあった。プール水や河川水でも不足する場合には海水を利用したが、延焼を抑えることができない箇所も存在した。京都市、大阪市、神戸市では消防水利として公設消火栓（水道管へ接続した消火栓）の占める割合が91.2%と全国平均73.9%を大きく上回り、防火水槽の割合は逆に5.7%と全国平均の24.8%を大きく下回っている⁹⁾。

このように都市域では消火栓への依存度が極めて高く、消火栓が使用できなくなった場合に消火活動に著しい支障を生じることが予想される。水道の信頼性を高めることも重要であるが、消火栓だけに依存するのではなく都市内に貯留水を確保することも必要となって

補遺表 6-2 被災後の区域・期間の区分と対策としての水道連絡管と施設内貯留施設の位置付け

	期間1 (3日間)	期間2 (7日間)	期間3 (復旧期)
直接被害区域	<p>× (×, ×)</p> <p>消防用水が緊急対応として必要となる¹が、水源として有効である水道水は、防火水槽の貯留水や水道施設内貯留水である。都市内の下水処理水を貯留しその水を利用することも有効である。²</p> <p>生命の危険から脱した都市生活者は自宅や避難所ですまず飲料水が必要とする。³自宅で利用できる水は、市販水・井戸水・溜水（ポリタンク水）などであり、⁴避難所・病院では水道の施設内貯留水が供給される。⁵連絡管によって他地域から水供給を受けても、給水区域内の幹線管路が被災した状態であり、自区域への給水は困難である。⁶</p> <p>下水処理水は消防用水だけでなく、トイレ用水としても有効に利用できる。⁷</p>	<p>○ (○, ×)</p> <p>需要の高まる飲料水やトイレ用水などを供給するため仮設水道や給水車による水供給が行われる。⁸連絡管の水を仮設水道の根元の幹線管路や給水車へ水補給する配水基盤に供給できれば有効である。⁹また、期間1で使った施設内貯留水などの様々な貯留施設への補給が必要である。¹⁰これらを効率的に行うことができるか否かは配水ブロック化計画・耐震化など給水区域内の整備状況に依存する。¹¹</p> <p>下水処理水をトイレ用水等として利用することは、この期間においても有効であると考えられる。⁷</p>	<p>◎ (◎, ×)</p> <p>水道管路の本格的な復旧が開始される時期であり大量の水が必要となる。連絡管によって供給される¹²復水は生活用水及び復旧用水として利用される。¹³復旧の効率は、当該区域の配水ブロック化・耐震化など給水区域内の整備状況に依存する。¹³</p> <p>下水処理水をトイレ用水等として利用することは、この期間においても有効である。⁷</p>
間接被害区域	<p>△ (○, ×)</p> <p>自宅では、飲料水やトイレ用水等に対して、市販水・井戸水・溜水（ポリタンク水・風呂水）などを利用する。¹⁴区域内の水道管路は被害を受けていないため、連絡管による水供給も可能だが、既存の配水池を利用することで飲料水分の水確保は可能である。¹⁵水が不足する点では直接被害区域と同様であるため、下水処理水をトイレ用水等として利用できる。¹⁶</p> <p>配水池の貯留水を利用する等により、給水する場合、都市生活者の水不足に対する受忍限度を考慮した水供給を行う必要がある。¹⁷</p>	<p>◎ (◎, ×)</p> <p>連絡管による水供給が行われることにより蛇口からの水利用が可能となる。¹¹様々な形で貯留されていた水が期間1で使用されたため、その分の水を補給する必要がある。¹⁸</p> <p>水は直接被害区域と同様に不足しており、下水処理水をトイレ用水等として利用することは有効である。⁷</p> <p>連絡管整備等により、水道管によって給水する場合、都市生活者の水不足に対する受忍限度を考慮した水供給を行う必要がある。¹⁷</p>	<p>◎ (◎, ◎)</p> <p>連絡管による水供給が行われることにより蛇口からの水利用が可能となる。¹¹</p> <p>直接被害区域と同様に水が不足するところも存在し、その地域では下水処理水をトイレ用水等として利用することが有効となる。⁷</p> <p>連絡管整備等により、水道管によって給水する場合、都市生活者の水不足に対する受忍限度を考慮した水供給を行う必要がある。¹⁷</p>
給水影響区域	<p>△ (○, ×)</p> <p>連絡管によって水供給を受けても直接被害区域へ送水する体制ができていない。¹⁹間接被害区域へ繋がる耐震幹線管路が存在するならば、同区域への水供給は可能である。²⁰</p> <p>水道管路によって蛇口での水利用が可能である区域のため、下水処理水を利用する都市生活者はいないと考えられる。²¹</p> <p>都市生活者の水不足に対する受忍限度（許容限度）を考慮した水供給を行う必要がある。²²</p>	<p>○ (○, ○)</p> <p>連絡管からの水供給を受けることにより給水車等により直接被害区域への水供給を行うことができる。²³また、間接被害区域へ送水可能な耐震幹線管路が存在すれば間接被害区域にも水供給が可能である。²⁰</p> <p>ただし、他地域への供給量によっては自区域の水圧が低下するため受忍限度（許容限度）を考慮した水供給が必要である。²²</p>	<p>◎ (○, ◎)</p> <p>連絡管からの水供給を受けることにより、直接被害区域へ通常の給水ルートで復旧用水を供給することができ、復旧は上流部から進められることが多いため給水影響区域への大量の水供給が必要である。²⁴</p> <p>また、間接被害区域へ送水可能な耐震幹線管路があれば間接被害区域にも水供給が可能である。²⁰</p> <p>他地域への供給量によっては自区域の水圧が低下するため受忍限度を考慮した供給が必要である。²²</p>

注1：各欄の左上の記号は、当該区域に連絡管を繋ぐことの有効性を示す。カッコ内は、当該区域（左）と隣接区域（右）に分け水供給を行うことの対策としての有効性を表す。

注2：アンダーラインの番号を付した記述の説明文を補遺本文に示している。

いる。この際、緊急遮断弁を付けた水道水の貯留などと共に下水処理水（高度処理水）を消防用水に利用することが有効であると考える¹⁰⁾。

3) 被災者を対象としたアンケート調査（ほぼ震度 7 の区域と重なる神戸市長田区・中央区・東灘区・芦屋市を対象に行ったサンプル数 406 の調査）より¹¹⁾、自宅生活者・避難所生活者は共に最も飲料水を必要としていた。また、神戸市水道局に寄せられた苦情などから被災後の応急的な水供給に対する要望の経時変化は以下のようなものである。同表からも被災直後から飲料水の確保が最も重要であることがわかる。

補遺表 6-3 神戸市水道局に寄せられた水供給に関する要望等¹¹⁾

被災後の経過日数	苦情等
初めの 3 日間	その日生きるための最小限の水
4～7 日目(1 週目後半)	飲料水・炊事用水・トイレ用水
8～14 日目(2 週目)	洗濯の水・避難所での入浴
15～28 日目(3～4 週目)	自宅での入浴・自宅での洗濯
29 日目以降	我慢の限界・通常と同水準の給水

4) アンケート調査より、地震発生直後から 3 日間の期間 1 では被災者の 4 割が市販水を利用している。この時期には給水車による水供給が十分に機能せず、飲料水の水源として使えるのは市販水・井戸水・溜水(ポリタンク水)などであった。

5) 病院は大口水使用者の 1 つであるが、震災時は特に負傷者の手当等に多量の水を必要とする。また、人工透析にも多くの水が必要となり¹²⁾、多数の被災者が生活する避難所とともに大量の水が必要となる場所である。このような施設では、被災直後は設置されている受水槽の水が重要であるが、応急給水体制が整った時点からは給水車による補給が不可欠である。

6) 震度 7 の区域では幹線管路の破損が激しく、また、この時期は復旧が始まらないため、水道管路からの給水は不可能な状態である³⁾。応急給水拠点の設置も不可能であり、連絡管によって他の事業体より水供給を受けたとしても直接被害区域ではその水を利用できない状態である。

7) 阪神・淡路大震災では、河川水がトイレ用水として利用されたが¹¹⁾、下水処理水についても、住居の近くに取水施設（貯留施設等）があるならば、運ぶ労力も軽くなり河川水と同様に利用され则认为する。ただし、阪神・淡路大震災の時に下水処理水が利用されなかった理由として次の 3 点が指摘されており¹²⁾、これらの問題を解決しておく必要がある。

- ・処理場の位置が市民のアクセスから不便なところに立地している
- ・普段から下水処理水を利用するという習慣がなく、とっさの場合に思いつかない
- ・処理水の取水方法などハード面で容易に取り扱いができる環境でない

8) 阪神・淡路大震災では、この時期に給水車による給水や応急給水拠点(仮設水道)の設置が行われ、応急給水が広まり始めた¹³⁾。

9) 連絡管による供給水を配水池まで幹線管路によって送水することが可能ならば、配水池を基地として給水車で市内に給水することができる。また、仮設水道についても幹線管路上に給水拠点を設置することにより連絡管の水を利用可能である。

10) 配水池や緊急備蓄施設などの水道施設内の貯留水は地震発生から3日以内にはほとんど使用されてしまう。阪神・淡路大震災では、配水池の貯留水の減少が激しく、地震発生当日や翌日に空になっている施設も見られた³⁾⁴⁾。それら施設に幹線管路や給水車を通じて水道水を補給することが必要である。

11) 配水ブロック化^{注)}・耐震化を行うことによって、連絡管等により確保した水を仮設水道や給水車を通じて効率的に給水することが可能である。間接被害区域では、連絡管を幹線管路に接続することにより蛇口からの水利用が可能である⁴⁾¹³⁾。

注) 配水ブロック化とは、水道管網（配水区域）をいくつかのブロックに分け、バルブで仕切ることによって給水圧を安定させ、かつ管理を容易にするものである。水道管網をブロック単位で構成されるシステムとして捉え、管路破損時の被害の拡大を抑えることができると共に、復旧作業を効率良く行うことが可能である⁵⁾⁶⁾¹³⁾。

12) 阪神・淡路大震災では、水道管路がある程度復旧すると、生活用水と復旧用水が共に必要となり、平常時よりも多くの水量が必要となった³⁾。他の事業体から連絡管によって送水される水は生活用水のみならず復旧用水として有効である。また、豊中市では、大阪府営水道からの緊急受水を受け、漏水しながらも配水を継続したことが早期復旧につながった。早期復旧という観点からも大量の水確保が必要であることが指摘されている⁴⁾。

13) 配水ブロック化によって、復旧時の止水や通水をスムーズに行うことができ、また、管路の耐震化によって直接的な被害を軽減することができることから、これらを対策として行うことによって復旧の効率が上がる。

14) 管路の被害がなくとも断水状態であることには変わりなく、直接被害区域と同様に水道以外の水源を利用する。阪神・淡路大震災では、自宅生活者は市販水・井戸水・溜水などを利用している。間接被害区域は、地震による施設等の破壊がない区域のため、断水を生じても避難をせずにほとんどの被災者が自宅で生活すると考えられる。飲料水としては市販水・井戸水・ポリタンク水等、トイレ用水としては風呂の残り水や河川水等が利用される¹⁾。ポリタンクについては、震災後に普及した溜水の方法である。

15) 間接被害区域は、管路の上流部の施設被害によって水供給が断たれることを想定している。したがって、連絡管によって水供給されることにより蛇口からの給水が可能であるが、既存の配水池には計画1日最大給水量の12時間分の水量が貯留されているため¹⁴⁾、区域内の飲料水3日以上の水が確保されていると考えられる。

16) 連絡管などによって水供給されない限り、直接被害区域と同様に断水状態となる。この時には、トイレ用水などの雑用水として、下水処理水が有効となる。阪神・淡路大震災では、水運びの重労働を伴う河川水の利用も行われているため下水処理水も同様に利用されることが考えられる¹⁾。

- 17) 受忍限度（給水制限時における水利用行動の変更に伴う水利用者のつらさ）を考慮した送水を行うことにより¹⁵⁾、都市生活者の視点から見た公平性を確保することができると考える。
- 18) 連絡管による水供給が無い時、期間 1 では配水池などの施設内貯留水が利用され、貯留量が減少する。このため、配水池等への水道水の補給が必要となる⁴⁾。
- 19) 直接被害区域では、地震発生直後のこの時期には水道管路の破損のために連絡管からの受水が不可能な状態である。また、給水影響区域においても被害調査等のため他区域への送水準備はできていない。このため、当該区域を中継とした送水も困難である。
- 20) 直接被害区域によって間接被害区域と給水影響区域が分断されている被害形態の事業体では、この 2 つの区域を繋ぐ耐震幹線管路を整備しておくことによって間接被害区域へ送水することが可能である。
- 21) 阪神・淡路大震災のアンケート調査より¹⁾、河川水の利用は他の水源が利用できない場合に利用している傾向が認められた。このことから、下水処理水の利用も同様に他の水源(この場合は水道水)を利用できる都市生活者が利用するとは考えにくい。
- 22) 給水影響区域の都市生活者は、平常時と同じ水利用が可能であるが、直接被害区域や間接被害区域の救援や復旧のために自らの使用水量を減らして隣接区域に供給することが考えられる。この場合も影響区域内の都市生活者に対して受忍限度（許容限度）の考え方を適用することができる。文献では¹⁵⁾、渇水時に 30%程度までの節水が行われたことが複数の都市で実証されており、この数値より平常時給水量の 7 割給水までが許容限度であると考えられる。
- 23) 給水影響区域から、直接被害区域や間接被害区域への給水車による給水が可能である。しかし、阪神・淡路大震災で見られたように、被災地における交通事情の悪化が予想されるため、早急な幹線管路の復旧が必要である⁴⁾。
- 24) 給水影響区域内の浄水場からは通常の給水ルートで復旧用水が供給される。連絡管によって送水された水も同様に通常のルートで復旧用水として利用できる。復旧用水は、下流部からでなく上流部からの供給が有効である²⁾。

【補遺の参考文献】

- 1) 日本水環境学会：「阪神・淡路大震災による水環境への影響と対策」報告書，1997.
- 2) 百々順一：阪神・淡路大震災の教訓と用水管理，震災時の用水確保方策に関するシンポジウム，pp.2-12，1997.
- 3) 神戸市水道局：「阪神・淡路大震災 水道復旧の記録」，1996.
- 4) 小倉 晋：神戸市水道システムの復旧と復興—ライフライン機能向上にむけて—，第 4 回水道管路国際シンポジウム，1997.
- 5) 萩原良巳・今田俊彦・森野彰夫：配水ブロック化評価プロセスに関する一考察，土木学会

第 18 回衛生工学研究討論会講演論文集, pp.215-220, 1981.

- 6) 今田俊彦・小棚木修：配水ブロック化方法に関する一考察, 全国水道研究集会, 38, 1987.
- 7) 神戸市消防局編：阪神・淡路大震災における消防活動の記録, 1995.
- 8) 消防庁消防課：消防力・消防水利の基準解説, 1984.
- 9) 関西水道事業研究会：消防用水確保の観点から見た都市の安全性と水道のあり方に関する一考察（水道と消防用水分科会報告書）, 1997.
- 10) 日本下水道協会：下水道の耐震対策マニュアル, p.79, 1997.
- 11) 大阪府水道地震対策調査委員会：大阪府水道地震対策基本方策, 1996.
- 12) 坂尻好郎：下水道の被災と下水処理水の再利用, 震災時の用水確保方策に関するシンポジウム, pp.40-47, 1997.
- 13) 厚生省生活衛生局水道環境部水道整備課 監修 水道技術センター：水道の耐震化計画策定指針の解説, 1997.
- 14) 厚生省監修・日本水道協会：水道施設設計指針・解説, 1990.
- 15) 清水康生・萩原良巳・西澤常彦：都市域における渇水時の水利用構造評価モデルに関する研究, 京都大学防災研究所水資源研究センター研究報告第 20 号, pp.69-80, 2000.

第7章 震災リスク軽減のための下水道システムに関する研究

7-1 緒言

本章では、大都市域水循環システムを再構成するための下水道システムにおける計画について述べる。その際のコンセプトは、第2章で提示した下水処理水の利用による水辺創成であり、震災時に防災・減災用水として利用すると共に平常時の都市生活者のアメニティ向上を図るというものである。本研究では、震災対策と平常時の環境対策は双対の関係にあると認識する。すなわち、両対策は本章で述べる水辺創成水路に関するひとつの計画のもとで提示できると考える。

まず、大都市域における震災時の水確保と平常時のアメニティ向上にとって下水処理水の利用が有効であることを述べ、処理水を利用した水辺創成水路を提案する。次いで大都市域水循環システムを評価する視点として、安定性の概念を説明する。この安定性を評価する方法として、水循環システムの有する輸送・水質変換・貯留という機能を震災ハザードに対する構造特性（点的か線的か）として捉え、分割された水循環システムをネットワークとして一体的に記述する方法を示す。そして、このネットワーク構造を評価するためにグラフ理論の概念を適用した構造評価指標を提案する。さらに、レイヤー間・レイヤー内の水循環をマトリクス演算により記述する方法を提示し、水辺創成水路を震災時の水確保と平常時のアメニティ向上の観点から評価する水辺創成モデルを提案する。この水辺創成水路で利用される下水処理水は、第4章での分析結果を踏まえ、震災により機能が停止している処理場を除き、被災を免れ機能している処理場から被災した各都市に配分される。

最後に水辺創成モデルと構造評価指標を活断層系が集中しかつ都市化の進んだ地域である淀川右岸地域へ適用した事例を示す。同地域は4つの活断層系の影響を受けるが、これらの中から同地域への影響が大きく、かつ下水処理場からの処理水の利用が効果的である生駒断層系を対象としたケースを示す。

7-2 下水処理水を利用した水辺創成¹⁾²⁾³⁾

7-2-1 平常時のアメニティ向上と震災時の水確保

都市生活者にとって、大都市域のアメニティの向上を図ることは重要である。ここで言うアメニティ（amenity）とは、「快適さ」を意味すると定義する。都市生活者にとってのアメニティの構成要素には、緑の豊かさ、良好な水環境、空気の清浄さ、静けさ等があると考えられる⁴⁾。本研究では、良好な水環境という観点からアメニティという言葉を使用する。第3章で指摘した産業従業者の集中した地域や住宅密集地域、また、水面積の少ない地域では水辺を創成（recreate）することによりアメニティを高めることができる。例えば、産業従業者の集中している京都市、大阪市、神戸市、住宅密度の高いそれら中心部

やその周辺都市である。さらに、市内河川に接した行政区を除けば他の行政区では水面積率の低い地域が存在している。

震災時には、この水辺が様々に利用される。例えば、震災による火災に対しては貴重な消防用水を提供する。第3章で指摘したように、延焼の危険性の高い木造住宅密集地域では貴重な水源である。京都市、大阪市、神戸市では、表3-4に示したように消防水利の約90%を消火栓に依存している。しかし、第6章で指摘した直接被害区域に位置する都市では、水道が震災後3日間（期間1）は全く使用できない状況が想定される。この時期の消防用水は貯留水に頼らざるを得ないが、その全てを水道水の貯留で賄うのは不可能である旨を指摘した。このような事態が予想される地域に、貯留施設を随所に設けた水路を整備することは防災・減災上の意義が高い。水路を流れる水が下水処理水（高度処理水）であれば、都市部には多量に存在するため、消防用水だけでなくトイレ用水や他の雑用水としても流水の利用価値が高い。

ここで、第1章で指摘した環境と防災の双対性という観点から、この水辺創成を捉えるならば、平常時は都市生活者のアメニティ向上のために利用され、震災と同時に水辺の利用目的を消防用水やトイレ用水等の防災・減災用水として利用するという連続性が確保されていると言える。また、震災対策としての施設投資で、平常時の有効利用もなされるならば投資はより有効である。以上のように水辺創成は、震災リスクのマネジメント方策として意義がある。

7-2-2 震災時の水確保策としての下水処理水の位置付け

平常時における都市のアメニティ向上のために水辺を創成することを前提とし、震災時にどのような場面で、どのような利用が可能であるか、阪神・淡路大震災の状況をふまえて以下に述べるものとする。

震災時に都市で必要とされる水量（水質）は、補遺表6-2に示したように地震発生後の時間経過により異なる。すなわち、どのような場面でどのような水を供給できるかということが重要となる。阪神・淡路大震災では地震直後に発生した大規模な火災に対する消防用水が必要となった⁹⁾。トイレ用水は火事が収まった後、断水が長期化するにつれてその必要性が高まり。飲料水はこの間、常に必要であった。また、震災時は水環境汚染の被害が顕著に現れる場面でもある。第5章で示したように、河川上流の工場やし尿処理場などの施設が被災した時、有害物質が水道水源へ流入し下流の取水口では取水ができなくなることが予想される。

上記の場面を想定した時に、被害を軽減し水利用を可能とする有効な対策として、水道施設における施設内貯留、水道連絡管の利用が考えられるが、第6章で考察したように震災時には水道が断水する可能性があるため震災後の3日間（期間1）は、貯留水が有効となる。しかし、施設内貯留だけではその水量に限りがある。

これに対して都市域に大量に存在する下水処理水を有効利用することが考えられる。し

かし、現状では下水処理水に対して大都市域水循環システムを構成する有用な水資源であるということが都市生活者と水管理者に認識されていない。下水道の管理者からは、阪神・淡路大震災の際に下水処理水が利用されなかった理由として以下の点が指摘されている⁶⁾。

- ①処理場の位置が市民のアクセスから不便なところに立地している
- ②普段から下水処理水を利用するという習慣がなく、とっさの場合に思いつかない
- ③処理水の取水方法などハード面で容易に取り扱いができる環境でない

これらの点に留意し、本章では、下水処理水を利用した水辺創成水路を提案する。その震災対策としての位置付けは第2章の表2-2に示したとおりである。すなわち、地震後3日間とそれ以降で状況を分け、阪神・淡路大震災の際に火災が鎮火するのに必要な日数が2日程度であったことから⁵⁾、期間1は消防用水と飲料用水が重要であると考ええる。同期間は、水道施設の被害により水供給が困難となることが想定されるため、対策として貯留が重要である。そこで、水辺創成水路の各所に消防用水を確保するための都市内貯留施設（貯留点と称する）を設けて、処理水を都市域に循環させることを考える。また、期間2以降については、必要水量としてトイレ用水の需要が高まるため、貯留点からの用水の取水を行うものとする。

上述した場面を前提として水辺創成水路を都市活動レイヤーにおける対策として位置付けた大都市域水循環システムの再構成の概念を図7-1に示す。

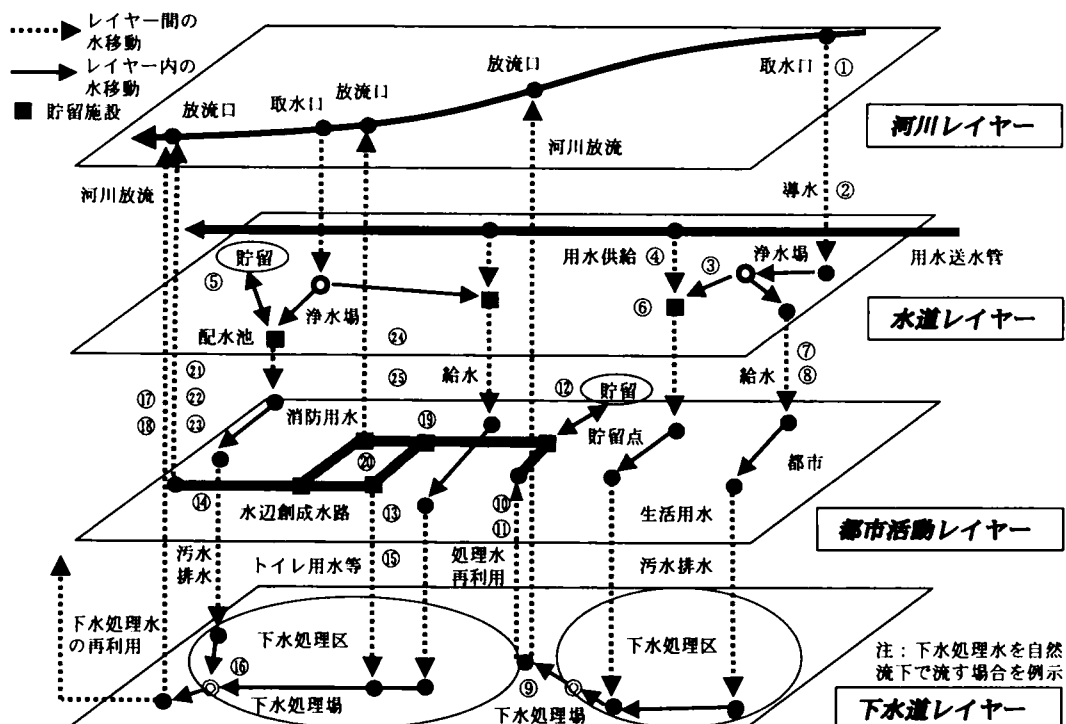


図7-1 大都市域水循環システムの再構成の概念（番号については7-4-1参照）

7-3 ネットワーク構造安定性の評価手法

7-3-1 大都市域水循環システムの評価の視点

(1) 評価主体

河川レイヤー、水道レイヤー、都市活動レイヤー及び下水道レイヤーから構成される水循環システムを評価する主体は、都市生活者である。震災時に都市生活者の水確保が可能であるか否かとの観点から大都市域水循環システムを評価する。

(2) 評価の視点

水循環システムを評価するにあたり、震災時の都市生活者に対して水供給が連続して行われるシステムを安定とする。そして、水供給の基準値を満たす程度を安定性と定義する（図 7-2 参照）。基準値としては、表 6-1 に示した 1 日平均給水量と許容限度水量を考える。本章では、

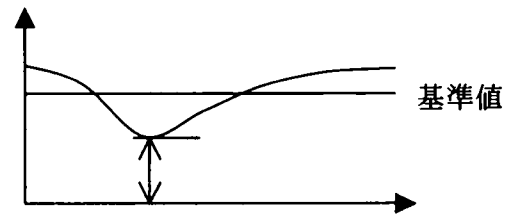


図 7-2 安定性の考え方

この安定性について評価する方法として、河川、水道、下水道として分割された水循環システムを一体として記述した水循環ネットワークの構造に着目した方法を提案する。

7-3-2 ネットワーク構造のモデル化^{7) ~ 11)}

ネットワーク（network）という言葉はグラフ（graph）と殆ど同義語として使われているが、単にノード（node）とリンク（link）とそれらの間の接続関係だけが与えられている場合はグラフといい、その上をものが移動したり、動いたりする場合にはネットワークと呼んで区別することが多い。ここでは、河川、水道、下水道から構成される大都市域水循環システムの有する構造を輸送・水質変換・貯留という特性で区別するのではなく、震災ハザードに対する構造特性（点的か線的な）に注目して、グラフ理論を適用したネットワークとしてモデル化する。以下にモデル化の方法について述べる。

(1) 大都市域水循環システムのネットワークとしての記述

図 7-1 に示した大都市域水循環システムをネットワークとして表す方法を述べる。

① 水質変換機能を有する施設

浄水場や下水処理場はノードとして記述する。また、都市生活者の水利用は、水道水（浄水）を汚水に変換するという意味で都市代表点と称するノードで表すものとする。

② 輸送機能を有する施設

送水管や汚水管渠などの水輸送機能を有する施設はリンクとして記述する。ただし、管路の結節点と各管路のシステム境界にはノードを設けるものとする。

③ 貯留機能を有する施設

配水池や施設内貯留施設、都市内貯留施設といった貯留施設は、グラフ理論のループを用いて表す。すなわち、ループ管に貯留容量に相当する太さと長さを与えて表現する。

④ その他の施設

水道取水口、処理水放流口の表現は、河川横断方向の中央に基準点を仮定し、堤内地にある取水場と放流施設をノードと考える（図 7-3 参照）。このモデル化により、取水施設、放流施設の被災をノード・リンクの機能停止・切断として表現する。

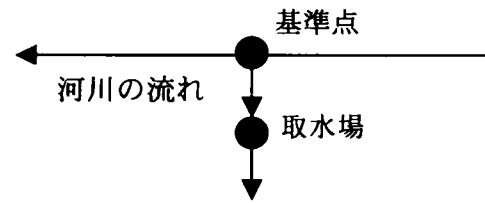


図 7-3 河川からの取水の記述

(2) 大都市水循環システムのネットワーク化

図 7-1 に示した大都市域水循環システムのネットワークは、ノードとそれらを結ぶリンクおよびループから構成される。同図におけるネットワークの構成要素を表 7-1 に示す。ただし、貯留点とは、前述のように水辺創成のために都市に送られてきた下水処理水を消防用水や生活用水として利用する貯留施設である。また、同表の記述方法により表記したネットワークモデルを図 7-4 に示す。ネットワークの境界となる河川流入点、流出点や用水流入点、流出点が端点（terminal）となる。

表 7-1 大都市域水循環システム構成要素のネットワークとしての記述

ネットワーク の構成要素	レイヤー			
	河川	水道	都市活動	下水道
ノード	河川流入点 基準点 河川流出点	取水場 浄水場 配水池 施設内貯留施設 用水流入点 用水流出点 用水供給点	都市代表点 都市内貯留施設 (貯留点) 給水点	下水処理場 放流施設
リンク	河川流路	幹線管路 (導水管) (送水管) (主要配水管)	水辺創成水路	下水道幹線 (污水管) (放流管)
ループ	—	配水池 施設内貯留施設	都市内貯留施設	—

(3) ネットワークの連結行列としての記述

大都市域水循環システムのレイヤー間の構造の特徴を知ることがを目的に、図 7-4 に表したグラフを河川レイヤー、水道レイヤー、都市活動レイヤー及び下水道レイヤーに注目して図 7-5 のように簡略化して記述することができる。同図では、レイヤーを 1 つのノードとして考え、水循環をノード、リンク、ループの 3 つで表現している。ただし、ここで言うループは、レイヤー内の水循環を意味している。このように表すことにより、大都市域水循環システムの全体構造を明確にすることができる。

さらに、ネットワークの構造は、連結行列（connected matrix）として表すことができる。表 7-2 は、図 7-5 を A から I までの部分に輸送量、リンクの強さ（太さ）、リンク間の距離、ノード数といった指標を記述することによりネットワークの構造特性を記述することができる連結行列である。

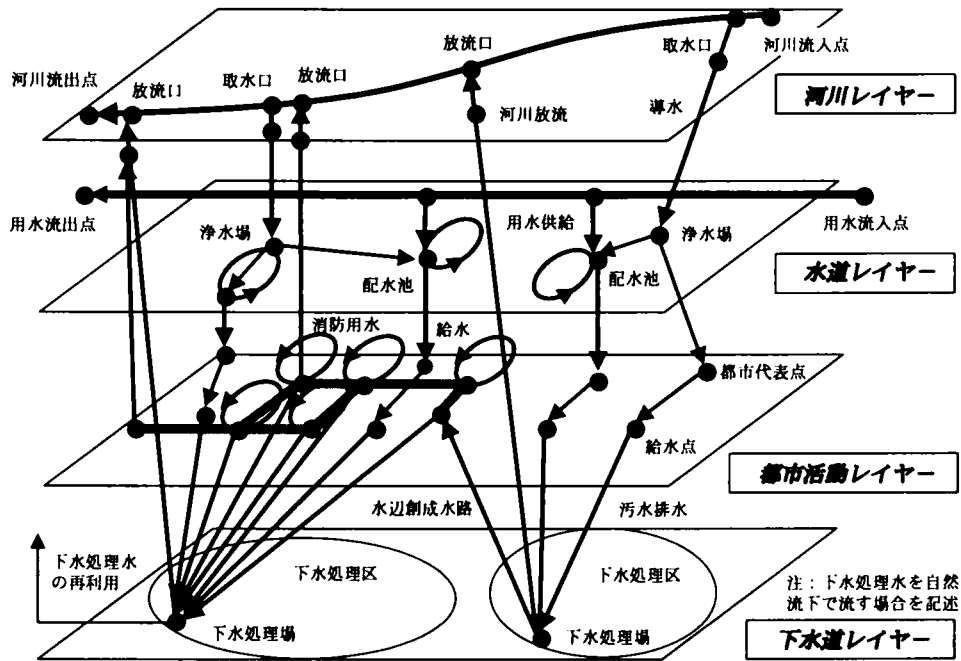


図 7-4 グラフとして記述された大都市域水循環システムモデル

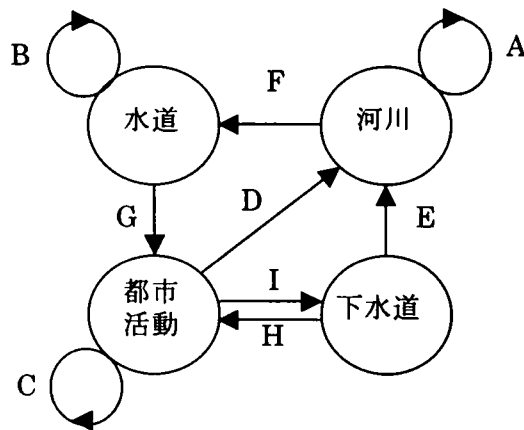


図 7-5 レイヤーに着目したネットワーク

表 7-2 連結行列によるネットワークの表示

		受水側											
		河川レイヤー			水道レイヤー			都市活動レイヤー			下水道レイヤー		
		要素1	要素2	要素3	要素4	要素5	要素6	要素7	要素8	要素9	要素10	要素11	要素12
送水側	河川レイヤー	要素1	A										
		要素2		F									
		要素3											
	水道レイヤー	要素4											
		要素5			B				G				
		要素6											
	都市活動レイヤー	要素7											
		要素8	D						C				
		要素9											
	下水道レイヤー	要素10											
		要素11	E						H				
		要素12											

7-3-3 ネットワーク構造安定性の評価指標^{7) ~11)}

(1) 評価指標

ネットワーク構造の評価の視点としては、構成要素であるノードやリンク、ループに着目する方法や循環の経路を考慮することが考えられる。

ノードに着目した場合には、そのノードの数やノードに何本のリンクが結ばれているかにより安定性を考えることができる。また、リンクに着目した場合にはリンクの太さによって安定性を評価することができる。例えば、取水した水を都市生活者に届けるまでを対象とした場合には、同じ水量を輸送する場合でも、リンクの数が多くそれらのリンクの太さに偏りが無い方が、震災の影響を受けにくく安定した水供給が可能である。また、水輸

送の経路（パス：path）に着目した場合には、カスケード型よりもサイクル型の方が水の確保は安定である。このように、ネットワークの安定性を表す指標は、着目する構成要素により複数存在する。

本章では、ネットワーク構造を評価する視点として、ノードに対してはその「数」、リンクに対しては「数」、「長さ」、「太さ（容量）」、ループはその「容量」を、さらに、それらを組み合わせた「パス」を考えるものとする。以上の観点から、次に示す13の評価指標を考案した。各評価指標の定義とネットワーク構造に対する解釈を説明する。

①点連結度 $k(N)$ ：ネットワーク N の最小切断集合のノード数

最小切断集合とはネットワーク N のノード集合 V の部分集合 V' で $N - V'$ が非連結になる場合の最小の集合をいう。最小切断集合のノードの数が多いほど、ネットワークの連結が強く構造安定である。

②辺連結度 $k_1(N)$ ：ネットワーク N の辺切断集合における辺の最小個数

辺切断集合の辺（リンク）の数が多いほど、ネットワークの連結が強く構造安定である。さらに、ネットワーク内の流れを考慮して、ソースとシンクのノードを想定することにより、辺の数でなく太さ（容量）という観点からも辺連結度を定義することができる。この場合には、最大流=最小切断の定理（max flow-min cut theorem）を用いて最小容量を与える辺切断集合を求めることが可能である。

注）最大流=最小切断の定理

ネットワーク N においてソース v_s からシンク v_t への流量 Q の最大値は、 $s \in M$, $t \in \overline{M}$ である辺切断集合の容量 $a(M, \overline{M})$ の最小値に等しい。ここに M は、ネットワーク N の部分集合であり、 $\overline{M} = N - M$ である。

③ノードに対するリンクの比率： $\sum d_N(v) / |V(N)|$ 、すなわちネットワーク N の全次数と位数の比率

次数とはネットワーク N のノード v に接続するリンクの個数をいい、 $d_N(v)$ で表す。また、位数とは、ネットワーク N のノードの数をいい $|V(N)|$ で表す。ノードに対するリンクの比率が高いほど、ネットワークの連結が強く構造安定である。

注）点連結度 k 、辺連結度 k_1 、最小次数 δ の関係について

次に示すホイットニー（H. Whitney）の定理がすべてのネットワークについて成立する。

$$k \leq k_1 \leq \delta$$

④ノードに接続するリンクの流量のばらつき： $\max(f_{l_i}) - \min(f_{l_i}) / \sum f_{l_i}$

$\max(f_{l_i})$ はノード i に接続するリンクの送水量 f_{l_i} の最大流量を表す。 $\min(f_{l_i})$ はノードに接続するリンクの送水量 f_{l_i} の最小流量を表す。ノードに対するリンクの流量のばらつきが低いほど、複数の水供給経路から同量の水が送られてくることになり、当該ノードへの水供給は構造的に安定であると考えられる。なお、流量のばらつきを表す指標については、リンクの数が多数の時、分散や標準偏差など一般的な指標を適用することも考えられる。

⑤平均離心数： $\sum e(v) / |V(N)|$ 、すなわちネットワーク N の離心数の総和/位数

離心数とは、ネットワーク N の任意のノード v から測られる最大距離をいい、 $e(v)$ で表す。平均離心数が小さいほどネットワークは空間的に構造が密であり、震災に対して構造安定である。

⑥冗長なパスの数：ネットワーク N の隣接しないノード v_1 と v_2 の冗長なパスの最大個数

冗長なパスとは、 v_1 と v_2 をネットワーク N 内の隣接しないノードとしたときの全ての v_1 - v_2 パスである。冗長なパスの最大個数が多いほど、ネットワークの連結が強く構造安定である。

⑦冗長なパスの流量のばらつき： $\max(f^2_i) - \min(f^2_i) / \sum f^2_i$

$\max(f^2_i)$ はノード i に接続する各冗長なパスの送水量 f^2_i の最大流量を表す。 $\min(f^2_i)$ は各冗長なパスの送水量 f^2_i の最小流量を表す。同程度の流量が流れる冗長なパスが存在する時には、被害が水量的に分散されるため水供給は構造的に安定であると考えられる。

⑧冗長なパスの貯留容量比率： $\sum(\text{パス上のノードの貯留容量}) / \text{パス上のノードの全給水量}$ 、すなわち、冗長なパス上の給水点ノードの全給水量に対する総貯留量の割合

水源汚染が発生し供給が絶たれる場合やパス上のリンクが切断した場合でも、貯留水を利用することで水供給が可能になる。パス上の貯留比率が高いことは、ノードへの水供給が構造的に安定であることを意味する。

⑨内素なパスの数：ネットワーク N の異なるノード v_1 と v_2 の内素なパスの最大個数

ネットワーク N の異なるノード v_1 と v_2 を結ぶ v_1 - v_2 パスが v_1 と v_2 以外にノードを共有しない時、このパスを内素という。内素なパスが多いことは、水供給システムの独立経路が多いことを意味する。内素なパスの数が多いほど水供給は構造的に安定である。メンガーの定理 (k.Menger's theorem) を適用してパスの数を求めることができる。

注) メンガーの定理

v_1 と v_2 をネットワーク N の 2 つの隣接しないノードとする。この時、 N 内の内素な v_1 - v_2 パスの最大個数は、その除去が全ての v_1 - v_2 パスを切断するようなノードの最小個数に等しい。

⑩内素なパスの流量のばらつき： $\max(f^3_i) - \min(f^3_i) / \sum f^3_i$

$\max(f^3_i)$ はノード i に接続する各内素なパスの送水量 f^3_i の最大流量を表す。 $\min(f^3_i)$ は各内素なパスの送水量 f^3_i の最小流量を表す。内素なパスの送水量のばらつきが小さければ被害が分散されるため水供給は構造的に安定であると考えられる。

⑪サイクル階数：一般的には「グラフ G において、サイクルが残っていないようにするために除去しなければならないリンクの最小数」であるが、本研究ではネットワーク（向きを考慮した有向グラフ）におけるサイクル数のことと定義する。

このサイクル階数が多いほど、当該ノードを中心として水を循環利用していることを意味する。従って、ノードで水を消費しない場合には、サイクル内を流れる水量を利用することができ、消費する場合でもサイクルに含まれるパス上の貯留容量を利用することが可能である。サイクル階数が多いほどネットワークの水供給は構造的に安定であると考え

る。

⑫サイクル比率：サイクルによる供給系統数／総供給系統数、すなわち、供給形態がサイクルである系統数の比率

サイクル形態での水供給は水源からの取水が困難となった場合でも、サイクル上のリンクが切断されない限り水供給が可能であり、サイクル内の貯留水の利用も可能であるため、サイクル比率が高いほど水供給は構造的に安定であると考えられる。ホフマンの定理(Hoffman's theorem)によりサイクルの存在を判断できる。

注) ホフマンの定理

$b_{ij} \leq x_{ij} \leq a_{ij}$ を満たす循環流が存在するための必要十分条件は、ネットワーク N の任意の部分集合 M に対して $a(M, \overline{M}) \geq b(\overline{M}, M)$ が成り立つことである。

a_{ij} ：ノード i, j を結ぶリンクの流量の上限

b_{ij} ：ノード i, j を結ぶリンクの流量の下限

\overline{M} ： $N - M$

$a(M, \overline{M})$ ：部分集合 M から部分集合 \overline{M} への流量の上限

$b(\overline{M}, M)$ ：部分集合 \overline{M} から部分集合 M への流量の下限

⑬サイクル流量比率：サイクルによる供給系統の流量／供給系統の流量、すなわち、供給形態がサイクルである系統の流量比率

サイクル形態での水供給は水源からの取水が困難となった場合でも、サイクル上のリンクが切断されない限り水供給が可能であり、サイクル内の貯留水の利用も可能であるため、サイクル形態で供給される水量の割合が高いほど水供給は構造的に安定である。

以上説明したネットワーク構造の評価指標を総括すると共に各指標がどのようなノードとリンクの特性に関連するかを表 7-3 に整理した。

同表より、全ての指標がノードまたはリンクの数に関係している指標であり、ネットワーク構造をリンクの長さを考慮して評価している指標は、平均離心数のみであることがわかる。

(2) 震災想定時にネットワーク上で仮定する事象

グラフ理論を適用しネットワークとして表記された大都市域水循環システムの構造評価を行うために評価指標を提案した。本研究では、同指標に対する「被災」状況として、「ノードの機能停止」と「リンクの切断」を想定する。

7-4 水辺創成モデルの定式化

図 7-1 で示した大都市域水循環システムにおける水の流れを定式化する。同図では下水処理水を自然流下で流す場合を例示しているが、以下に説明する方法により下水処理水を上流に圧送する場合も定式化が可能である。

定式化は各レイヤー内にノードを定義することにより、ノードの対応関係として水の輸送を表現する。具体的には、水道レイヤーで取水施設と浄水場、下水道レイヤーで下水処

表 7-3 ネットワーク構造の特性を表す指標

番号	指標	定義	解釈	ノードとリンクについて考慮される内容		
				数	長さ	経路
①	点連結度 $k(N)$	ネットワーク N の最小切断集合のノード数 ^{注1)}	最小切断集合のノードの個数が多いほど、ネットワークの連結が強く構造安定である。	○		
②	辺連結度 $k_e(N)$	ネットワーク N の辺切断集合の辺の最小個数	辺切断集合の辺の個数が多いほど、ネットワークの連結が強く構造安定である。	○		○
③	ノードに対するリンクの比率	$\sum d_N(v) / V(N) $ すなわち、ネットワーク N の全次数と位数の比率 ^{注2)} ^{注3)}	ノードに対するリンクの比率が高いほど、ネットワークの連結が強く構造安定である。	○		
④	ノードに接続するリンクの流量のばらつき	$\max(f_1) - \min(f_1) / \sum f_1$ ^{注4)} ^{注5)}	ノードに対するリンクの流量のばらつきが低いほど、複数の水供給経路から同程度の水が送られてくることになり、当該ノードへの水供給は構造的に安定である。	○		○
⑤	平均離心数	$\sum e(v) / V(N) $ すなわち、ネットワーク N の(離心数の総和)/位数 ^{注6)}	平均離心数が小さいほどネットワークは空間的に構造が密であり、震災に対して構造安定である。	○	○	
⑥	冗長なバスの数	ネットワーク N の隣接しないノード v_1, v_2 の冗長なバスの最大個数 ^{注7)}	冗長なバスの最大個数が多いほど、ネットワークの連結が強く構造安定である。	○		○
⑦	冗長なバスの流量のばらつき	$\max(f_2) - \min(f_2) / \sum f_2$ ^{注8)} ^{注9)}	同程度の流量が流れる冗長なバスが存在する時には、被害が水量的に分散されるため水供給は構造的に安定であると考ええる。	○		○
⑧	冗長なバスの貯留容量比率	$\Sigma(\text{バスの経路上のノードの貯留容量}) / \text{ノードの給水量}$ すなわち、給水点ノードの給水量に対する、冗長なバス上の総貯留量の割合	水を貯留することにより、水源汚染が発生したりバス上のリンクが切れたりする場合でも、貯留水を利用することにより水供給が可能であるため、貯留比率が高ければ v_1, v_2 間の水供給が安定する。	○		○
⑨	内素なバスの数	ネットワーク N の異なるノード v_1 と v_2 の内素なバスの最大個数 ^{注10)}	内素なバスが多いことは、水供給系統の独立経路が多いことを意味する。内素なバスの数が多いほど水供給は構造的に安定である。	○		○
⑩	内素なバスの流量のばらつき	$\max(f_3) - \min(f_3) / \sum f_3$ ^{注11)} ^{注12)}	内素なバスの送水量のばらつきが小さければ被害が分散されるため水供給は構造的に安定であると考ええる。	○		○
⑪	サイクル階数	向きを考慮した(ネットワークにおける)サイクル数	このサイクル階数が多いほど、当該ノードを中心として水を循環利用していることを意味する。従って、ノードで水を消費しない場合には、サイクル内を流れる水量を利用することができ、消費する場合でもサイクルに含まれるバス上の貯留容量を利用することが可能である。サイクル階数が多いほどネットワークの水供給は構造的に安定であると考ええる。	○		○
⑫	サイクル比率	サイクルによる供給系統数/供給系統数 すなわち、供給形態がサイクルである系統数の比率	サイクル形態での水供給は水源からの取水が困難となった場合でも、サイクル上のリンクが切断されない限り水供給が可能であり、サイクル内の貯留水の利用も可能であるため、サイクル比率が高いほど水供給は構造的に安定であると考ええる。	○		○
⑬	サイクル流量比率	サイクルによる供給系統の流量/供給系統の流量 すなわち、供給形態がサイクルである系統の流量比率	サイクル形態での水供給は水源からの取水が困難となった場合でも、サイクル上のリンクが切断されない限り水供給が可能であり、サイクル内の貯留水の利用も可能であるため、サイクル形態で供給される水量の割合が高いほど水供給は構造的に安定である。	○		○

注1：最小切断集合とは N の点集合 V の部分集合 V' で $N-V'$ が非連結になる場合の最小の集合をいう。
 注2：次数とは N のノード v に接続するリンクの個数をいい $d_N(v)$ で表す。
 注3：位数とは N のノードの数をいい $|V(N)|$ で表す。
 注4： $\max(f_1)$ はノード i に接続するリンクの送水量 f_i の最大流量を表す。
 注5： $\min(f_1)$ はノード i に接続するリンクの送水量 f_i の最小流量を表す。
 注6：離心数とは、 N の任意のノード v から測られる最大距離をいい、 $e(v)$ で表す。
 注7：「冗長なバス」とは、 v_1, v_2 を N 内の隣接しないノードとしたときの全ての v_1, v_2 バスとする。
 注8： $\max(f_2)$ はノード i に接続する各冗長なバスの送水量 f_2 の最大流量を表す。
 注9： $\min(f_2)$ はノード i に接続する各冗長なバスの送水量 f_2 の最小流量を表す。
 注10： N の異なるノード v_1, v_2 を結ぶ v_1, v_2 以外にノードを共有しない時このバスを内素という。
 注11： $\max(f_3)$ は各内素なバスの送水量 f_3 の最大流量を表す。
 注12： $\min(f_3)$ は各内素なバスの送水量 f_3 の最小流量を表す。

理場と放流施設、都市活動レイヤーで水供給点(都市代表点)と都市内の貯留点を考える。ただし、水道の施設内貯留や下水処理水の都市内貯留については、期間内に貯留水が利用されることを仮定し、単位を管路流量と同じ次元(例えば $\text{m}^3/\text{日}$)として定式化する。

以上により大都市域水循環システム全体の水循環を定式化した後、都市活動レイヤーと下水道レイヤーに対象を絞り、下水処理水を各都市に配分する水辺創成モデルの目的関数と制約条件を示す。

7-4-1 大都市域水循環システムの定式化

各ノードの対応関係として水循環の水量的な連続関係を表現する。以下で丸括弧の番号で示した項目の大都市域水循環システムでの位置付けを図 7-1 中に同じ番号で示した。

- ・河川の取水施設 i ($i=1, \dots, a$: a は取水口の数)
- ・水道事業体の浄水場 j ($j=1, \dots, b$: b は浄水場の数)
- ・市町村 k ($k=1, \dots, c$: c は市町村の数)
- ・下水処理場 l ($l=1, \dots, d$: d は下水処理場の数)
- ・放流施設 m ($m=1, \dots, e$: e は放流口の数)
- ・貯留点 n ($n=1, \dots, f$: f は貯留点の数)

(1) 河川取水口からの取水量

河川取水口からの取水量を表すベクトルを q^1 とする(図 7-1 の番号①)。

$$q^1 = (q_1^1 \ \dots \ q_a^1 \ \dots \ q_a^1) \quad q_i^1 \leq q_i^r \quad (7.1)$$

q_i^1 : 河川取水口 i からの取水量 q_i^r : 取水口 i の水利権量

(2) 水道事業体浄水場の浄水量

河川取水量を水道浄水場に導水する比率を表すマトリクスを M^1 とする(同②)。また、浄水場の浄水量を表すベクトルを q^2 とする(同③)。

$$M^1 = \begin{pmatrix} M_{11}^1 & \dots & \dots & \dots & M_{1b}^1 \\ \vdots & \ddots & & \ddots & \vdots \\ \vdots & & M_{ij}^1 & & \vdots \\ \vdots & \ddots & & \ddots & \vdots \\ M_{a1}^1 & \dots & \dots & \dots & M_{ab}^1 \end{pmatrix} \quad (7.2)$$

$$q^2 = q^1 M^1 = (q_1^2 \ \dots \ q_j^2 \ \dots \ q_b^2) \quad (7.3)$$

M_{ij}^1 : 取水口 i での取水量の浄水場 j への導水比率 q_j^2 : 浄水場 j の浄水量

(3) 水道用水供給事業体からの受水量

水道用水供給事業体が浄水場(配水池)に送る送水量を表すベクトルを q^3 とする(同④)。

$$q^3 = (q_1^3 \ \dots \ q_j^3 \ \dots \ q_b^3) \quad (7.4)$$

q_j^3 : 浄水場 j の給水区域における水道用水供給事業体からの受水量

(4) 浄水場からの全給水量

水道施設内に貯留されている浄水量を表すベクトルを q^a とする (同⑤)。また、浄水場の全浄水量を表すベクトルを q^4 とする (同⑥)。

$$q^a = (q_1^a \quad \cdots \quad q_j^a \quad \cdots \quad q_b^a) \quad (7.5)$$

$$q^4 = q^2 + q^3 + q^a = (q_1^4 \quad \cdots \quad q_j^4 \quad \cdots \quad q_b^4) \quad (7.6)$$

q_j^a : 浄水場 j 内 (浄水場系内) に貯留されている浄水量 q_j^4 : 浄水場 j の持つ全浄水量

(5) 浄水場から市町村へ送られる浄水量

浄水場の持つ浄水を市町村に配分する比率を表すマトリクスを M^2 とする (同⑦)。また、浄水場 j から市町村 k へ送られる浄水量を表すベクトルを q^5 とする (同⑧)。

$$M^2 = \begin{pmatrix} M_{11}^2 & \cdots & \cdots & \cdots & M_{1c}^2 \\ \vdots & \ddots & & \ddots & \vdots \\ \vdots & & M_{jk}^2 & & \vdots \\ \vdots & \ddots & & \ddots & \vdots \\ M_{b1}^2 & \cdots & \cdots & \cdots & M_{bc}^2 \end{pmatrix} \quad (7.7)$$

$$q^5 = q^4 M^2 = (q_1^5 \quad \cdots \quad q_k^5 \quad \cdots \quad q_c^5) \quad (7.8)$$

M_{jk}^2 : 浄水場 j の浄水を市町村 k へ配分する比率 q_k^5 : 市町村 k へ送られる全浄水量

(6) 下水処理場から市町村へ配分する下水処理水量 (水辺創成水路による)

下水処理場の処理水の再利用率を式 (7.9) に示す対角マトリクス X^a で表す (同⑨)。また、下水処理場から再利用する処理水を市町村に配分する比率を表すマトリクスを式 (7.10) に示す X^b で表す (同⑩)。下水処理場から水辺創成水路により市町村へ送水する処理水量を表すベクトルは式 (7.11) で表される q^6 となる (同⑪)。なお、下水処理場 l の処理水量を表すベクトルを式 (7.12) の q^7 で与える。

$$X^a = \begin{pmatrix} X_l^a & & & 0 \\ & \ddots & & \\ & & X_l^a & \\ & & & \ddots \\ 0 & & & & X_d^a \end{pmatrix} \quad 0 \leq X_l^a \leq 1 \quad (7.9)$$

$$X^b = \begin{pmatrix} X_{11}^b & \cdots & \cdots & \cdots & X_{1c}^b \\ \vdots & \ddots & & \ddots & \vdots \\ \vdots & & X_{lk}^b & & \vdots \\ \vdots & \ddots & & \ddots & \vdots \\ X_{d1}^b & \cdots & \cdots & \cdots & X_{dc}^b \end{pmatrix} \quad \sum_{k=1}^c X_{lk}^b = 1 \quad (7.10)$$

$$q^6 = q^7 X^a X^\beta = (q_l^6 \quad \cdots \quad q_k^6 \quad \cdots \quad q_c^6) \quad (7.11)$$

$$q^7 = (q_l^7 \quad \cdots \quad q_l^7 \quad \cdots \quad q_d^7) \quad (7.12)$$

X_l^a : 下水処理場 l の下水処理水の再利用率

X_{lk}^β : 下水処理場 l で処理された下水処理水の市町村 k への配分比率 (第 1 行より d 行へ処理場盤高の降順の並びとする)

q_k^6 : 市町村 k へ送られる下水処理水量 q_l^7 : 下水処理場 l の下水処理量

(7) 市町村に貯留されている浄水の貯留量

市町村の貯留点に貯留されている処理水量を表すベクトルを q^β とする (同⑫)。

$$q^\beta = (q_l^\beta \cdots q_n^\beta \cdots q_f^\beta) \quad (7.13)$$

q_n^β : 貯留点 n に貯留されている下水処理水量

(8) 下水処理場に流入してくる汚水量

市町村で使用された水道水の各下水処理場への流入比率を表すマトリクスを M^3 で表す (同⑭)。一方、貯留点に送られてきた下水処理水量を q^9 とする。この処理水の生活用水としての利用率を対角マトリクス X^7 で表す (同⑬)。貯留点で生活用水として利用した処理水の各処理場への流入比率をマトリクス M^4 で表す (同⑮)。以上より、処理場への流入汚水量 q^7 は式 (7.18) となる (同⑯)。

$$M^3 = \begin{pmatrix} M_{ll}^3 & \cdots & \cdots & \cdots & M_{ld}^3 \\ \vdots & \ddots & & \ddots & \vdots \\ \vdots & & M_{kl}^3 & & \vdots \\ \vdots & \ddots & & \ddots & \vdots \\ M_{cl}^3 & \cdots & \cdots & \cdots & M_{cd}^3 \end{pmatrix} \quad (7.14)$$

$$q^9 = (q_l^9 \quad \cdots \quad q_n^9 \quad \cdots \quad q_f^9) \quad (7.15)$$

$$X^7 = \begin{pmatrix} X_l^7 & & & & 0 \\ & \ddots & & & \\ & & X_n^7 & & \\ & & & \ddots & \\ 0 & & & & X_f^7 \end{pmatrix} \quad 0 \leq X_n^7 \leq 1 \quad (7.16)$$

$$M^4 = \begin{pmatrix} M_{ll}^4 & \cdots & \cdots & \cdots & M_{ld}^4 \\ \vdots & \ddots & & \ddots & \vdots \\ \vdots & & M_{nl}^4 & & \vdots \\ \vdots & \ddots & & \ddots & \vdots \\ M_{fl}^4 & \cdots & \cdots & \cdots & M_{fd}^4 \end{pmatrix} \quad (7.17)$$

$$\begin{aligned} q^7 &= q^5 M^3 + (q^9 + q^6) X^7 M^4 \\ &= (q_l^7 \cdots q_l^7 \cdots q_d^7) \end{aligned} \quad (7.18)$$

M_{kl}^3 : 市町村 k で使用した水道水の下水処理場 l への流入比率

q_n^9 : 貯留点 n へ水辺創成水路を通じて送られてきた下水処理水量

X_n^7 : 貯留点 n における下水処理水の生活用水としての利用率

M_{nl}^4 : 貯留点 n から取水した処理水の下水処理場 l への流入比率

(8) 下水処理場から河川へ放流される処理水量

河川へ放流される処理水量の各放流口への放流比率を表すマトリクスを M^5 とし(同⑰)、下水処理場から河川へ放流される下水処理水量をベクトル q^8 で表す(同⑱)。

$$M^5 = \begin{pmatrix} M_{ll}^5 & \cdots & \cdots & \cdots & M_{le}^5 \\ \vdots & \ddots & & \ddots & \vdots \\ \vdots & & M_{lm}^5 & & \vdots \\ \vdots & \ddots & & \ddots & \vdots \\ M_{dl}^5 & \cdots & \cdots & \cdots & M_{de}^5 \end{pmatrix} \quad (7.19)$$

$$q^8 = \{q^7(I - X^a)\} M^5 = (q_l^8 \cdots q_m^8 \cdots q_e^8) \quad (7.20)$$

M_{lm}^5 : 下水処理場 l への下水処理水の河川の放流口 m への放流割合

q_m^8 : 放流口 m から放流される下水処理水量 I : 単位マトリクス

(9) 市町村から貯留点へ送られる下水処理水

市町村に送られてきた下水処理水を貯留点へ配分する比率を表すマトリクスを M^6 とし(同⑲)、貯留点へ送られる下水処理水量を表すベクトルを q^9 とする(同㉑)。

$$M^6 = \begin{pmatrix} M_{ll}^6 & \cdots & \cdots & \cdots & M_{lf}^6 \\ \vdots & \ddots & & \ddots & \vdots \\ \vdots & & M_{kn}^6 & & \vdots \\ \vdots & \ddots & & \ddots & \vdots \\ M_{cl}^6 & \cdots & \cdots & \cdots & M_{cf}^6 \end{pmatrix} \quad (7.21)$$

$$q^9 = q^6 M^6 = (q_l^9 \cdots q_n^9 \cdots q_f^9) \quad (7.22)$$

M_{kn}^6 : 市町村 k に送られてきた下水処理水の貯留点 n への配分比率

q_n^9 : 貯留点 n へ送られる下水処理水量

(10) 貯留点から河川へ放流される下水処理水量

貯留点に送られてくる処理水の河川への放流割合を表す対角マトリクスを X^9 とし(同㉒)、処理水の各河川への直接放流比率を表すマトリクスを M^7 とする(同㉓)。以上より、貯留点から河川へ放流される下水処理水量を表すベクトルを q^{10} で表す(同㉔)。

$$X^\delta = \begin{pmatrix} X_1^\delta & & & 0 \\ & \ddots & & \\ & & X_n^\delta & \\ 0 & & & \ddots & \\ & & & & X_f^\delta \end{pmatrix} \quad 0 \leq X_n^\delta \leq 1 - X_n^\gamma \quad (7.23)$$

$$M^7 = \begin{pmatrix} M_{11}^7 & \cdots & \cdots & \cdots & M_{1e}^7 \\ \vdots & \ddots & & \ddots & \vdots \\ \vdots & & M_{nm}^7 & & \vdots \\ \vdots & \ddots & & \ddots & \vdots \\ M_{f1}^7 & \cdots & \cdots & \cdots & M_{fe}^7 \end{pmatrix} \quad (7.24)$$

$$q^{10} = (q^\gamma + q^\beta) X^\delta M^7 = (q_1^{10} \quad \cdots \quad q_m^{10} \quad \cdots \quad q_e^{10}) \quad (7.25)$$

X_n^δ : 貯留点 n に送水・貯留された下水処理水の河川への放流比率

M_{nm}^7 : 貯留点 n から放流される下水処理水の放流口 m への直接放流比率

q_m^{10} : 貯留点から放流口 m への直接放流量

(11) 消防用水等の河川への流出量

貯留点の処理水を消防用水等として使用した後に各河川放流口へ間接流出する比率を表すマトリクスを M^8 とする (同 ㉔)。 M^8 により、河川への間接流出量を表すベクトル q^{11} は式 (7.27) となる (同 ㉕)。

$$M^8 = \begin{pmatrix} M_{11}^8 & \cdots & \cdots & \cdots & M_{1e}^8 \\ \vdots & \ddots & & \ddots & \vdots \\ \vdots & & M_{nm}^8 & & \vdots \\ \vdots & \ddots & & \ddots & \vdots \\ M_{f1}^8 & \cdots & \cdots & \cdots & M_{fe}^8 \end{pmatrix} \quad (7.26)$$

$$q^{11} = (q^\gamma + q^\beta)(I - X^\gamma - X^\delta)M^8 \\ = (q_1^{11} \quad \cdots \quad q_m^{11} \quad \cdots \quad q_e^{11}) \quad (7.27)$$

M_{nm}^8 : 貯留点 n から放流される下水処理水の放流口 m への間接流出比率

q_m^{11} : 消防用水等の放流口 m への間接流出量

7-4-2 水循環システムの連続式

ここでは大都市域水循環システムの水の流れを記述する。ただし、システム内の貯留水を利用する場合とする。

(1) 河川レイヤーへの流入と流出

下水処理場から河川に放流される放流量 q^δ 、貯留点から河川に直接放流される放流量 q^{10} および消防用水等による河川への間接流出量 q^{11} が河川レイヤーに流入するが、この

水量は、河川取水口から取水した水量 q^1 、水道用水供給事業者から受水した水量 q^3 、水道施設内の浄水貯留量 q^a 、貯留点の処理水貯留量 q^b の和に等しい。

$$\sum_{m=1}^c q_m^8 + \sum_{m=1}^c q_m^{10} + \sum_{m=1}^c q_m^{11} = \sum_{i=1}^a q_i^1 + \sum_{j=1}^b q_j^3 + \sum_{j=1}^b q_j^a + \sum_{n=1}^f q_n^b \quad (7.28)$$

(2) 水道レイヤーへの流入と流出

確保される全浄水量 q^4 と浄水場から市町村へ送られる浄水量 q^5 は等しい。

$$\sum_{j=1}^b q_j^4 = \sum_{k=1}^c q_k^5 \quad (7.29)$$

(3) 都市活動レイヤーへの流入と流出

浄水場から送られてくる浄水量 q^5 、水辺創成水路を通じて下水処理場から送られてくる処理水量 q^6 及び貯留点の処理水貯留量 q^b が都市活動レイヤーに存在し、これらは市町村で利用された浄水と貯留点で生活用水として利用された処理水が汚水として下水処理場へ流入する量 q^7 、貯留点から直接河川に放流される処理水量 q^{10} 及び貯留点で消防用水等として使われて河川へ間接流出する水量 q^{11} の和と等しい。

$$\sum_{k=1}^c q_k^5 + \sum_{k=1}^c q_k^6 + \sum_{n=1}^f q_n^b = \sum_{l=1}^d q_l^7 + \sum_{m=1}^e q_m^{10} + \sum_{m=1}^e q_m^{11} \quad (7.30)$$

(4) 下水道レイヤーへの流入と流出

下水処理場に流入してくる汚水量 q^7 は、下水処理場が河川に放流する下水処理水量 q^8 と水辺創成水路により市町村に送る下水処理水量 q^6 の和と等しい。

$$\sum_{l=1}^d q_l^7 = \sum_{m=1}^e q_m^8 + \sum_{k=1}^c q_k^6 \quad (7.31)$$

(5) 河川流量の連続条件

上流の流量基準点 R から下流の $R+1$ の間で流量の連続条件を示す。 $q^1 q^8 q^{10} q^{11}$ がその間の取水量と放流量を表すならば、河川流量に関して次式が成立する。

$$q^{R+1} = q^R - \sum_{i=1}^a q_i^1 + \sum_{m=1}^e q_m^8 + \sum_{m=1}^e q_m^{10} + \sum_{m=1}^e q_m^{11} \quad (7.32)$$

q^R : 河川の流量基準点 R における流量

(6) 下水処理水の循環の記述

式 (7.11) で表される処理水の再利用量 q_k^6 の右辺に順次対応する式を代入することにより式 (7.33) を得る。同式を用いて下水処理水の循環の定式化について説明する。

$$q^6 = \left\{ (q^1 M^1 + q^3 + q^a) M^2 M^3 + (q^6 M^6 + q^b) X^r M^4 \right\} X^a X^b \quad (7.33)$$

同式は、決定変数 X^a , X^b , X^r が掛け合わされた非線形式となっている。また、 q^6 が両辺に現れており処理水が循環することが表現されている。右辺の第1項は市町村で使用された水道浄水が下水処理場に流入することを示し、第2項は水辺創成水路を流れる処理水及び貯留水が生活用水として利用され再び処理場に流入することを表している。

7-4-3 目的関数と制約条件

(1) 震災時の目的関数と制約条件

震災時に市町村が必要とする処理水量と下水処理場が配分する処理水量との乖離を最小にすることを目的関数として定式化する。

$$\text{minimize } \sum_{k=1}^c (q_k^d - q_k^e) \quad (7.34)$$

q_k^d : 震災時に市町村 k で必要となる消防用水量またはトイレ用水量等

q_k^e : 下水処理場から市町村 k へ送る下水処理水量 (式 (7.33) より与えられる)

そして、震災時に市町村が必要とする水量以上に下水処理水を配分しないことを次のように制約式とする。

$$q_k^d \geq q_k^e \quad (7.35)$$

(2) 平常時の目的関数と制約条件

水辺創成水路に流れる水量と水路周辺の誘致人口が多いほどアメニティが向上すると考え¹²⁾、アメニティが最大になるように処理水を配分することを目的関数として定式化する。

$$\text{maximize } \sum_{k=1}^c (E_k^I \times q_k^e) \quad (7.36)$$

ただし、

$$E^I = (E_1^I \quad \dots \quad E_k^I \quad \dots \quad E_c^I), \quad E_k^I = U \times S_k \times T_k + R_k$$

E_k^I : 市町村 k に送水することによるアメニティ効果 (人)

U : 水辺創成水路の誘致距離 (定数とする: km)

S_k : 水路のルート上に位置する市町村の人口密度 (人/km²)

T_k : 市町村 k までの水路の距離 (km)

R_k : 処理水を配分する市町村 k の人口 (人)

次に震災時の被害の軽減を考えた下水処理水の配分量と平常時のアメニティの向上を考えた下水処理水の配分水量の差を許容する限度として調整定数を設け、次のように制約式とする。この調整定数は震災時の必要水量を基準としている。

$$\left| \frac{q_k^e - q_k^d}{q_k^d} \right| \leq S \quad (7.37)$$

q_k^e : 震災時を想定した時に市町村 k に送られる下水処理水量 ((1)で求解される)

S : 調整定数

7-5 淀川右岸地域における事例分析²⁾³⁾

7-5-1 水辺創成水路による代替案の作成

(1) 淀川大都市域における水辺創成可能地域

1) 水道システムと下水道システムの区域の対応関係

水道システムでは、京都市水道・京都府水道・大阪市水道・大阪府水道・神戸市水道・

阪神水道企業団という主要な水道事業体により提携の議論を行った。本節で分析する下水道システムの水辺創成水路は、桂川・宇治川・木津川・淀川・大和川という大河川を越えることなく、処理水は府県内でのみ利用すると仮定する（ただし、大阪市は人口の集積度が高いため大阪府と分けて考える）。

2) 水辺創成水路の送水経路の決定

水辺創成を行うことが可能な地域を明らかにする。水辺創成水路は、下水処理場から開水路によって隣接する都市（市・区役所の位置を都市代表点とする）まで下水処理水を送水し、さらに隣接する都市へ順次処理水を送水するものとする。ただし、水路を流れる処理水は、エネルギー節約のため自然流下を仮定する。また、本研究は流域レベルで水の移動を捉えるため、処理場と市町村及び市町村相互の送水経路は、両者を結ぶ最短経路である直線を仮定する。以上の仮定に基づき、隣接関係と標高を考慮した関係行列を作成しISM¹³⁾ (Interpretive Structural Modeling)の援用により、処理水の送水可能経路を決定する。この際に水道システムと下水道システムで対象区域の整合を図る必要があるが、図 7-6 に示すように、京都市、京都府、大阪市、大阪府、神戸市、兵庫県という枠組みで捉えることにより両システムの水量的な対応付けが可能である。

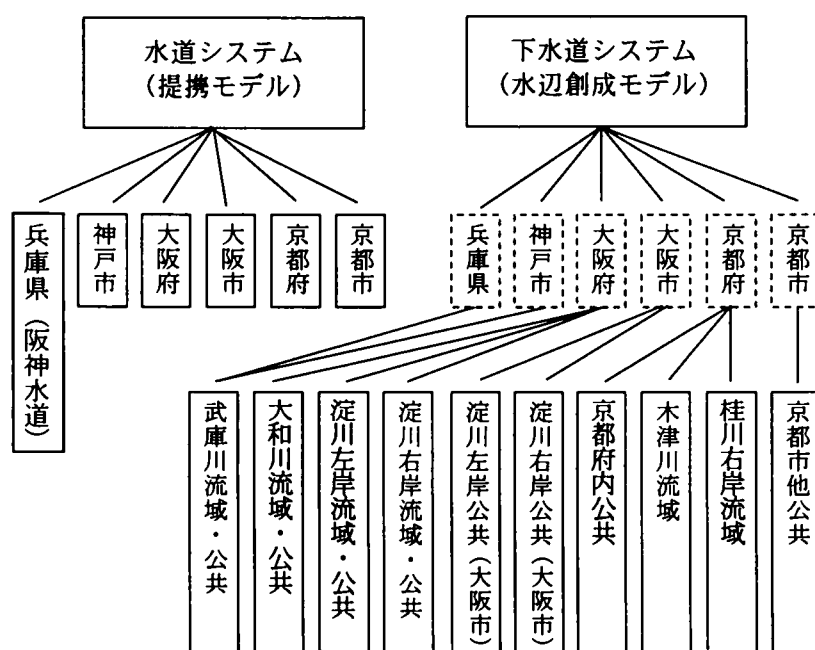


図 7-6 水道システムと下水道システムの対象区域の対応

3) 水辺創成水路の導入が可能な地域

2)で述べた方法に基づき対象地域において水辺創成水路の導入が可能な区域を活断層系毎に表 7-4 に示す。また、何れかの活断層系に対して水路の導入が可能な区域を図 7-7 に示す。同表より下水処理水を利用できるのは中下流域の 5 区域に限定されることがわかる。この理由は、以下のとおりである。

- ①処理場が区域の中で地盤高の最も低い場所や流末に建設されている
- ②地盤高では送水可能な位置に都市代表点が存在しても隣接していないため自然流下での送水が困難
- ③震度7で機能停止が想定される下水処理場は除外している

表 7-4 水辺創成水路の導入が可能な区域

名称	活断層系					
	花折	西山	有馬	生駒	上町	六甲
①京都市他公共	-	-	-	-	-	-
②桂川右岸流域	-	-	-	-	-	-
③木津川流域	-	-	-	-	-	-
④京都府内公共	-	-	-	-	-	-
⑤淀川右岸公共（大阪市）	-	-	-	-	-	-
⑥淀川左岸公共（大阪市）	-	-	-	○	○	-
⑦淀川右岸流域・公共	-	○	○	○	○	-
⑧淀川左岸流域・公共	-	○	○	○	-	-
⑨大和川流域・公共	-	-	-	-	○	-
⑩武庫川流域・公共	-	-	○	-	-	-

注：○印は下水処理水を利用できる区域である

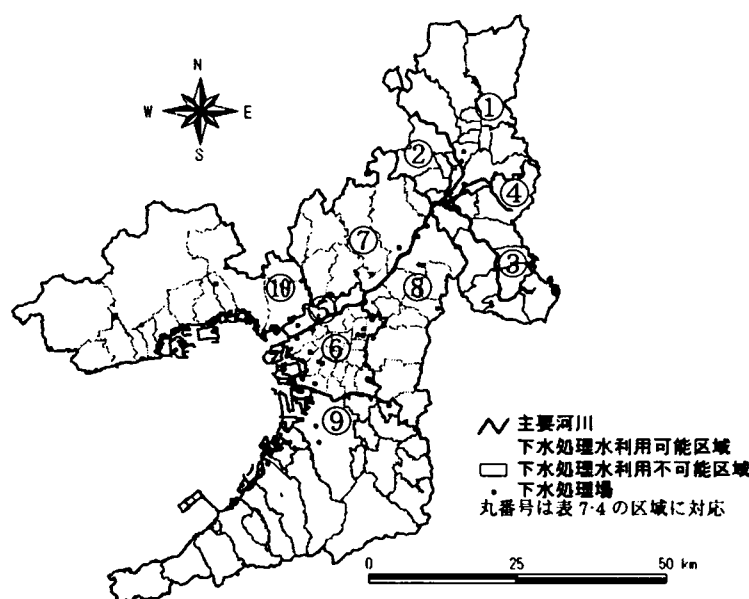


図 7-7 水辺創成水路の導入が可能な区域

(2) 淀川右岸区域への適用条件

1) 対象とする活断層系と前提条件

水辺創成モデルを震災ハザードが多く重なり、かつ人口が集中し下水処理場が多数存在している「淀川右岸流域・公共」区域(以下、淀川右岸区域と称す)に適用する。同区域は複数の活断層系の影響を受けるが、同区域への影響が大きく、かつ下水処理場からの処理水の利用が複数の都市で可能である生駒断層系を分析対象とする。前提条件として、震災

ハザード（震度7区域）と水道幹線管路、浄水場、下水幹線管渠、下水処理場等の水循環施設が重なった場合、それらは機能しないと仮定する。貯留点は都市代表点のみとし、貯留量は考慮しない。貯留点から取水し利用した処理水は、下水幹線管渠、下水処理場の被災及び仮設の污水貯留施設を利用するため再び下水処理場に流入することはないと仮定する。また、水辺創成水路自身は震災ハザード内でもその機能を維持すると仮定する。

2) 震災ハザードを考慮した送水可能都市

対象区域に生駒断層系の震災ハザードを重ね、被災した市町を対象として処理水を送る経路を決定する。図7-8に被災していない下水処理場と処理水を必要とする被災都市、それらを結ぶ水路の経路を示す。

3) 必要水量の算定

震災時に必要な用水の中で、消防用水とトイレ用水は下水処理水で補うことができる。消防水利の要件は、流水では取水可能量が1m³/分以上で連続40分以上、貯留施設の場合では常時貯水量が40m³以上であると定められている¹⁴⁾。また、トイレ用水は1人当たり1日40リットル使用すると考える¹⁵⁾。火災発生件数の想定は、阪神・淡路大震災のデータを基に震度7の区域で1km²につき1.8件の発生を仮定する⁵⁾。

以上の仮定より、生駒断層系が引き起こす震災を想定し、直接被害区域と水環境汚染が発生し取水が困難となった時に淀川右岸区域において必要となる用水量は表7-5のとおりである。

4) 下水処理場の処理能力

震災が発生したとき震災ハザード内にある下水道施設は機能しなくなり被災区域の汚水は下水処理場に流入しないと仮定する。ただし、今回のモデル適用地域にある正雀処理場と原田処理場の処理区域に関しては被災せず汚水流入量の減少はない。

表 7-5 淀川右岸区域の必要水量

市町名	人口 (人)	被災率	想定火災 発生件数 (件)	消防用水 (m ³)	被災人口 (人)	トイレ 用水 (m ³ /日)	環境汚染時 トイレ用水 (m ³ /日)
豊中市	398,908	—	—	—	—	—	15,956
池田市	104,293	—	—	—	—	—	4,172
吹田市	342,760	—	—	—	—	—	13,710
高槻市	362,270	0.61	48.2	69,349	221,878	8,875	14,491
茨木市	258,233	0.23	13.6	19,639	60,538	2,422	10,329
箕面市	127,542	—	—	—	—	—	5,102
摂津市	87,330	0.29	7.0	10,126	25,280	1,011	3,493
島本町	30,339	—	—	—	—	—	1,214
合計	1,711,675	—	68.8	99,114	307,696	12,308	68,467

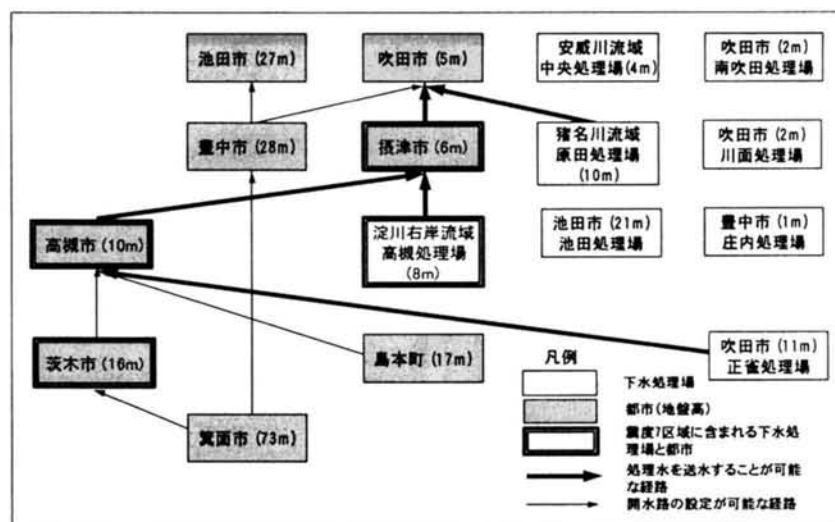


図 7-8 水辺創成水路による下水処理水の送水経路

5) 下水処理水の配分

都市代表点に対して送水量を決定するに際しては、震災時の水量を確保することを最優先と考え、まず、処理水量の規模の大きい下水処理場から各市町への送水を分析する。その結果、必要水量が不足する場合には順次、送水可能である他の下水処理場を含め市町への送水可能量を決定する。

(3) 水辺創成モデルの解法

水辺創成モデルは、式 (7.33) で表される都市 k に送られる処理水量 q_k^6 を目的関数である式 (7.34) と式 (7.36) に代入して、制約条件である式 (7.35) と式 (7.37) のもとで決定変数 X^a , X^b を解くことになる。しかし、目的関数と制約式のいずれも非線形である。このため、図 7-9 に示すアルゴリズムにより解を求めた。

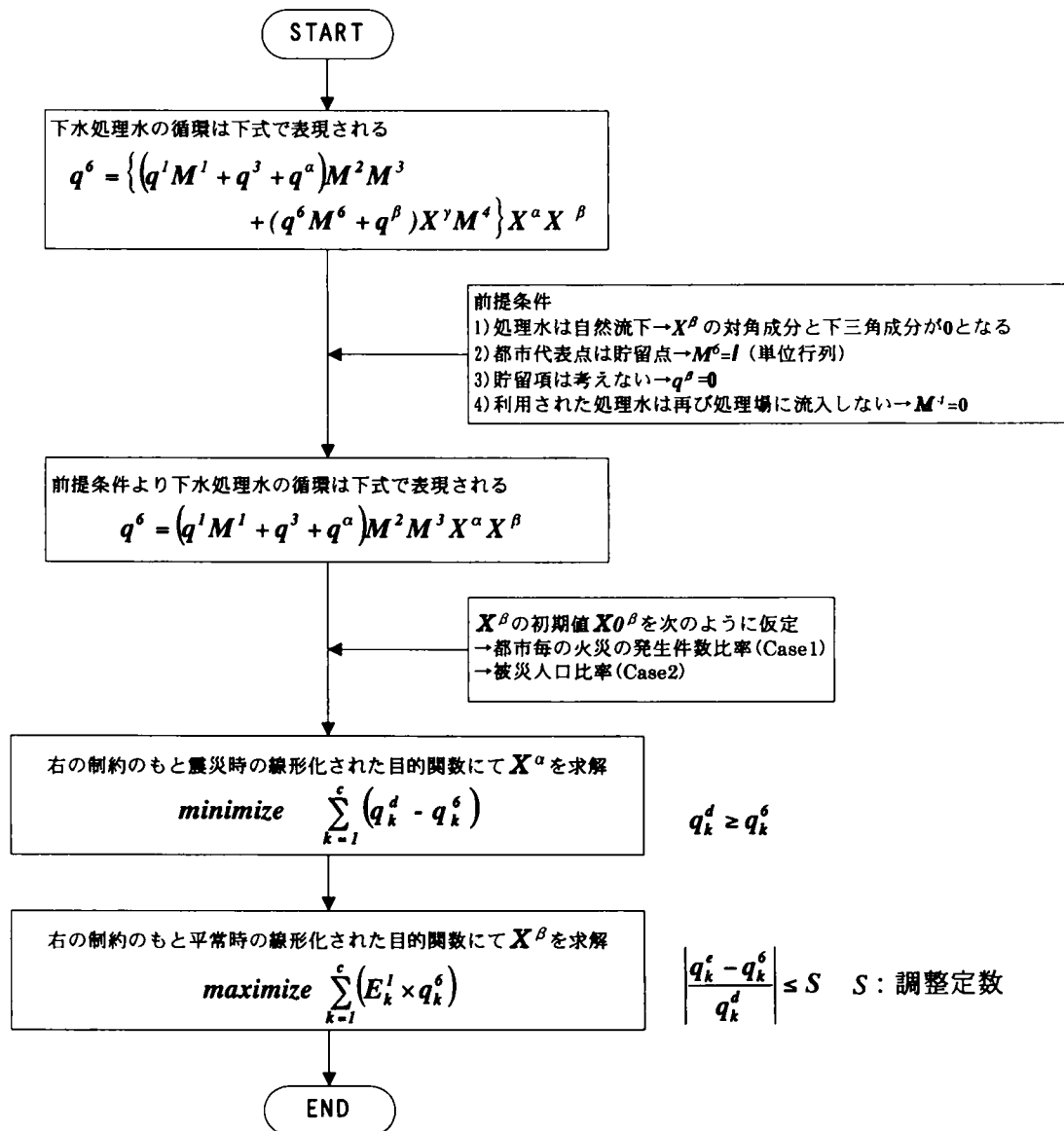


図 7-9 水辺創成モデルの解法

まず、水辺創成モデルを解くに際し、利用する下水処理水は自然流下を仮定するため、カスケード型の利用となる。水路の下水処理水を消防用水に利用した場合にはその水は河川に流出する。また、トイレ用水として利用した場合にも下水幹線管渠、下水処理場の被災及び仮設トイレの利用などにより下水処理場には流入しないと考えている。

従って、式(7.33)中の M^4 は0となるが、目的関数は依然として、 X^a と X^b の非線形式である。同式を直接求解する困難さを避けるため、同式を多段的に線形化して解を求める。まず、震災時の必要水量を確保することが重要と考え、下水処理場における下水処理水の利用率割合 X^a を X^b (初期値)を仮定することにより決定する。 X^b の初期値 $X0^b$ は、利用する処理水を各市町に配分する比率を表しているが、この比率は震災時に想定される火災発生件数や被災人口の大きさと相関があると考え、これらの比率で初期値を与えるものとする。

次にその結果得られる X^a を与件とした式(7.36)を用いて、各処理場の処理水の全量を送水区域の平常時のアメニティ効果が最大となるよう市町への配分比率 X^b (決定値)を決定する。ただし、初期値として与えた震災時の各市町の必要水量 $X0^b$ と大きく乖離しないよう制約条件を与える。すなわち、アメニティ向上のための処理水配分量と震災時の被害軽減のための配分量の差の絶対値を震災時の必要水量 $X0^b$ で除す。この割合をある値(調整定数と称す)以下になるよう式(7.37)に示す制約条件を設ける。本事例では渇水時の給水制限の報告を参考に¹⁶⁾、調整定数を0.1(1割)と設定した。

市町 k へ送水することのアメニティ効果の大きさは $E_k^1 \times q_k^6$ で与えられるが、 E_k^1 は単位水量当りの経路全体におけるアメニティ効果を表し水路延長 T_k と水路沿線都市の人口密度 S_k 及び誘致距離 U を乗じた結果に処理水の送り先の市町人口 R_k を加えた値である。なお、本事例では誘致距離を500m¹²⁾とした。

(4) 水辺創成モデルの適用結果と考察

1) 直接被害区域の消防用水を対象とした分析結果

直接被害区域における消防用水を水辺創成水路を流れる流水で確保し、沿線のアメニティ効果をできるだけ高くする処理水の最適配分を求める(Case1)。この際、 X^a を求める時の X^b (初期値)は各市町の火災発生件数の比により決定した(表7-6参照)。分析の結果、正雀処理場の処理水が少ないことから火災が発生した場合、消防活動を十分に行うだけの処理水を配分することができないことが分かった(充足率0.49)。平常時のアメニティの向上を考えた時、摂津市の充足率は0.39に減少したが、高槻市の充足率は0.51と若干の増加であった。この理由は、高槻市の火災発生件数が摂津市の約7倍という大きな値のためである。

2) 直接被害区域のトイレ用水を対象とした分析結果

直接被害区域におけるトイレ用水の確保を目的とした下水処理水の最適配分を求める(Case2)。直接被害区域は全期間を通じて共通である。この時の X^b (初期値)は、各市町の被災人口の比により決定する(表7-7参照)。トイレ用水の必要水量は消防用水に比べ少

表 7-6 直接被害区域の消防用水を対象とした分析 (Case1)

処理場→市	アメニティ 効果 (人)	消防用水 必要水量 (m ³ /日)	震災時を想定した場合平				常時を想定した場合		
			X ^d の値 (初期値)	X ^a の値	送水量 (m ³ /日)	充足率	X ^d の値 (決定値)	送水量 (m ³ /日)	充足率
正雀処理場→高槻市	400,018	69,349	0.87	1.00	34,154	0.49	0.92	35,167	0.51
正雀処理場→摂津市	159,148	10,126	0.13		4,987	0.49	0.08	3,974	0.39
合計	559,166	79,475	1.00	—	39,141	—	1.00	39,141	—

表 7-7 直接被害区域のトイレ用水を対象とした分析 (Case2)

処理場→市	アメニティ 効果 (人)	トイレ用水 必要水量 (m ³ /日)	震災時を想定した場合平				常時を想定した場合		
			X ^d の値 (初期値)	X ^a の値	送水量 (m ³ /日)	充足率	X ^d の値 (決定値)	送水量 (m ³ /日)	充足率
正雀処理場→高槻市	400,018	8,875	0.90	0.25	8,875	1.00	0.91	8,976	1.01
正雀処理場→摂津市	159,148	1,011	0.10		1,011	1.00	0.09	910	0.90
合計	559,166	9,886	1.00	—	9,886	—	1.00	9,886	—

表 7-8 直接被害区域・間接被害区域のトイレ用水を対象とした分析 (Case3)

処理場→市	アメニティ 効果 (人)	トイレ用水 必要水量 (m ³ /日)	震災時を想定した場合平				常時を想定した場合		
			X ^d の値 (初期値)	X ^a の値	送水量 (m ³ /日)	充足率	X ^d の値 (決定値)	送水量 (m ³ /日)	充足率
正雀処理場→吹田市	453,290	13,710	0.28	0.81	13,710	1.00	0.34	15,081	1.10
正雀処理場→高槻市	400,018	14,491	0.58		14,491	1.00	0.54	13,469	0.93
正雀処理場→摂津市	159,148	3,493	0.14		3,493	1.00	0.13	3,144	0.90
合計	1,012,456	31,694	1.00	—	31,694	—	1.00	31,694	—

ないため正雀処理場の下水処理水の利用だけで、必要水量を満たすことができる（充足率 1.00）。アメニティの向上を考えた時には、Case1 と同様に高槻市に多くの処理水を送ることとなり、高槻市の充足率は 1.00 から 1.01 と僅かではあるが増加する。一方、摂津市の充足率は 1.00 から 0.90 へ減少する。

なお、留意すべきことは、開水路の途中に貯留点として消防用の都市内貯留施設を設けておけば、トイレ用水の必要水量だけを考えた Case2 の下水処理水量の配分であっても消防用水を確保できる点である。

3) 直接被害区域と間接被害区域のトイレ用水を対象とした分析結果

生駒断層系の地震により表 4-1 に示すよう村野浄水場が被災するため淀川右岸全域が間接被害区域となる。また、生駒断層系の震災が発生した場合に有害物質が淀川に流入し表 5-5 に示す大阪府磯島取水口を含む下流の水道取水が困難になる。このため、図 3-1 に示すよう吹田市は淀川からの自己水も取水が困難となる。これらの事態を想定し (Case3)、直接被害区域と間接被害区域のトイレ用水を下水処理水で賄うことを考えた場合の下水処理水の最適配分を求めた (表 7-8 参照)。

水環境汚染を想定すると、下水処理水の送水が可能でかつ必要水量が発生する都市として吹田市が加わる。この時、正雀処理場の処理水量だけで吹田市、高槻市、摂津市への必要水量を全て賄うことができる。しかし、吹田市、高槻市、摂津市の順に水路沿線の人口集積度が高いため、アメニティ向上を考えて処理水の配分を行った場合には、吹田市の充足率が 1.00 から 1.10 に、高槻市の充足率が 1.00 から 0.93 に、摂津市の充足率が 1.00 から 0.90 となる。

以上の各 Case により求められた下水処理水の送水量を図 7-10 に示す。水環境汚染を考えた場合には、対象区域の 7 市 1 町全ての市町村で処理水を必要としているにも関わらず、3 市以外に処理水を送ることができない。これは、下水処理場が地盤の低い河川流末に集中している事が原因であると考えられる。

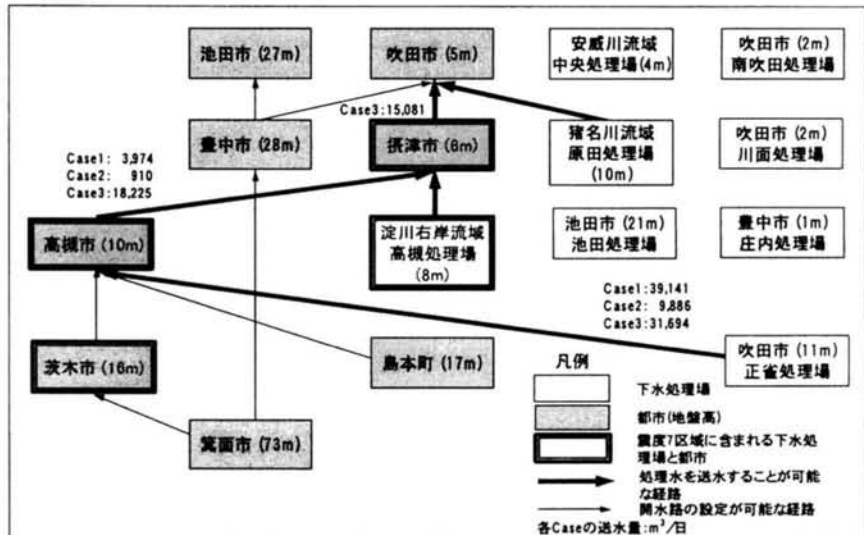


図 7-10 水辺創成水路による下水処理水の送水量

処理場が下水を排除するという、これまでの下水道の政策から考えれば効率のよい施設配置であるが、下水を河川に放流するだけではなく、利用するという観点からみた場合には、適切な配置ではないと言える。

7-5-2 ネットワーク構造安定性の評価

同区域の現状と水辺を創成した場合のネットワーク構造安定性の違いを調べるため、表 7-3 に示した指標群を適用した結果を述べ、その適用可能性と構造安定性の変化について説明する。本事例では、都市代表点と給水点を同一ノードとして扱った。また、淀川右岸区域を対象とするため、村野浄水場からの用水供給パスは淀川水管橋の右岸位置を上流端ノードとし、淀川本川から取水される大阪府三島浄水場と吹田市浄水場からの供給は、取水場を上流端ノードとみなした。終点は各都市代表点（給水点）である。

まず、指標①②④⑤⑦⑧⑩⑪⑫⑬の 10 つの評価指標は、本事例が流域レベルでネットワーク化を行っているため、また、給水点への水供給ルートが少ない（単独である）との理由から、適用できないと判断した。具体的な理由と指標が適用可能な場合について以下に説明する。

点連結度（指標①）と辺連結度（指標②）は、現状と水辺創成水路を導入した場合で共に 1 で変わらない。これは、用水流入点と流出点で端点となるためである。ネットワーク境界が本事例のように端点として与えられる場合に同指標は有効でなく、他の供給区域まで含めたネットワーク化により端点がなくなった場合に有効である。

ノードに接続するリンクの流量のばらつき（指標④）は、都市代表点（給水点）への水供給リンクが現状では 1 本であり水辺創成水路を設けた場合には 2 本となるような場合、流量の最大と最小の差が定義できない。淀川右岸区域の場合、現状の水供給リンクが 1 本の都市が多いため同指標は本事例では有効な指標でない。複数の水供給リンクを有する場

合には有効である。

平均離心数（指標⑤）については、本事例で用水供給点から給水点（都市代表点）までを直線と仮定し、さらに下水処理場から都市代表点までの水辺創成水路も直線と仮定しているため、ノード間の距離算出には意味がないと判断し、指標値の算出を行わなかった。対象地域を市町村レベルで捉え経路まで考慮する場合には有効な指標と考える。

冗長なパスの流量のばらつき（指標⑦）、冗長なパスの貯留容量比率（指標⑧）、内素なパスの流量のばらつき（指標⑩）は、指標④⑤と同様の理由により本事例では適用することができない。指標⑦⑩は複数の水供給リンクを有する場合に有効となる指標であり、指標⑧は市町村レベルで貯留施設の配置まで考慮した場合に有効である。

サイクル階数（指標⑪）は、本事例で処理水の圧送を考えない自然流下のみを仮定しているため、対策の前後で共に 0 である。サイクル比率（指標⑫）とサイクル流量比率（指標⑬）も同様な理由により変化しない。これらの評価指標は、処理水の上流への圧送までを考慮した場合に有効となる評価指標である。

次に、指標③⑥⑨を適用した結果から淀川右岸区域のネットワーク構造安定性がどのように変化したかを以下に述べる。

まず、ノードとリンクの数に着目した指標であるノードに対するリンクの比率（指標③）は、現状のノードの数が 47 に対して総リンク数が 130 となり、2.77 となる。水辺創成水路を導入した場合のノードの数は現状と変わらず 47 であるが、総リンク数は 140 となり、ノードに対するリンクの比率は 2.98 と高くなった。対象地域の水循環ネットワークはリンクが増えたことにより連結が強くなり構造安定になったと言える。

水辺創成水路を導入することにより、図 7-10 に示す吹田市、高槻市、摂津市は下水処理場から処理水の送水を受けることとなる。この結果、冗長なパスの数（指標⑥）は、吹田市（2→11）、高槻市（1→3）、摂津市（1→3）と増加する。水供給経路が多数となったことにより水供給は構造的に安定になった。

さらに、内素なパスの数（指標⑨）は、吹田市（2→4）、高槻市（1→2）、摂津市（1→2）へと増加した。パスが増加した給水点では、独立な水供給経路が確保されたことになり、この意味でも水供給は構造的に安定になったと言える。

ネットワーク構造安定性の評価は、指標③⑥⑨によりノードとリンクの数、経路の数という観点から評価を行うことが可能であった。

7-6 結言

本章では、震災時の用水確保と平常時のアメニティ向上を目的とした水辺創成モデルを提案した。また、水循環ネットワークの構造安定性を評価する評価指標を提示した。同モデルを淀川右岸区域に適用し下水処理水の最適な配分についての考察を行った。提案したモデルとそれを適用した結果を整理すれば以下のとおりである。

- (1) 防災・減災計画は、防災と環境の双対性を認識することが重要である。本研究では、この認識のもとで大都市域において震災時の消防用水とトイレ用水等の確保のために有効となり、かつ平常時には都市生活者のアメニティ向上にも寄与する下水処理水を利用した水辺創成水路を提案した。
- (2) まず、水確保の安定性を水供給の基準値を満たす程度と定義した。そして安定性を評価する方法として、分割された水循環システムを一体的に記述した水循環ネットワークの構造に着目した。すなわち、水辺創成水路を設けることにより水確保の安定性が増すことを明らかとするため、大都市域水循環システムの構造特性（点的か線形的か）に注目し同システムをグラフ理論を適用したネットワークとしてモデル化した。次いで、このネットワークモデルの構造安定性を評価するためにグラフ理論を適用し 13 の評価指標を提示した。
- (3) 大都市域水循環システムにおけるレイヤー間やレイヤー内の水移動（水収支）をマトリクス演算により記述する方法を提案した。次いで都市に配分する下水処理水量を決定するために、震災時の必要用水（消防用水、トイレ用水等）の確保と平常時のアメニティ向上の両方を目的関数とした水辺創成モデルを提案した。同モデルでは、配分水量を求めるために非線形式を解かなければならない。事例分析では、非線形式の求解の困難さを避け、まず重要であると考ええる震災時次いで平常時と 2 段階に分けてモデル式を線形化して順次解くという方法を提示した。
- (4) 複数の活断層系が重なり合い、人口の集積度が高く下水処理場が複数存在する淀川右岸区域を対象として、同区域への影響が大きくかつ下水処理場からの処理水の利用が効果的である生駒断層系を対象とした事例分析を行った。この結果、下水処理場の処理水をどこの都市にどれだけ配分することが有効であるかを具体的に指摘すると共に、そのような水辺創成水路の建設による水循環ネットワークの構造安定性について提案した 13 の指標による評価を試みた。各指標の適用可能性について考察した結果、事例が流域レベルのネットワーク化モデルであるため等の理由により、対象地域に適用できた指標は「ノードに対するリンクの比率」「冗長なパスの数」及び「内素なパスの数」の 3 つであった。これら指標からは、水辺創成水路を導入することによるネットワーク構造安定性の向上を検証することができた。
- (5) また、事例分析の結果、淀川右岸の 7 市 1 町全ての市町村で処理水を必要としているにも関わらず、3 市以外に処理水を送ることができない結果となった。この理由は、下水処理場が地盤高の低い河川流末に集中している事が原因である。下水とその処理水を効率よく排除するという、これまでの下水道整備の考え方に基づいた施設配置は、処理水を河川に放流するだけではなく都市域で利用するという観点からみた場合に適切な配置ではないことを事例分析を通じて明らかとした。

【参考文献】

- 1) 萩原良巳・清水康生：地震時を想定した大都市域水循環システムの再構成に関する考察，京都大学防災研究所年報 44 号，pp.63-78，2001.
- 2) 西村和司・清水康生・萩原良巳：下水処理水を利用した大都市域の水辺創成と地震被害の軽減に関する研究，日本地域学会第 38 回年次大会，pp.187-194，2001.
- 3) 西村和司・清水康生・萩原良巳：大都市域での下水処理水利用による水辺創成と地震被害の軽減に関する研究，環境システム研究，Vol.29，pp.369-376，2001.
- 4) 進士五十八：アメニティ・デザイン，学芸出版社，1992.
- 5) 神戸市消防局：阪神淡路大震災における消防活動の記録[神戸市域]，財団法人神戸市防災安全公社，1995.
- 6) 坂尻好郎：下水道の被災と下水処理水の再利用，阪神・淡路大震災に学ぶ震災時の用水確保方策に関する総合シンポジウム公演集，1997.
- 7) 深尾毅：システムの数理，数理科学シリーズ 9，筑摩書房，1975.
- 8) 浜田隆資・秋山仁：グラフ論要説，槇書店，1982.
- 9) 伊理正夫・古林隆：ネットワーク理論，日科技連，1976.
- 10) 大石泰彦訳・Robin,J.Wilson・John,J.Watkins：グラフ理論へのアプローチ，日本評論社，1997.
- 11) 大石泰彦訳・Oystein Ore・Robin,J.Wilson：やさしくくわしいグラフ理論入門，日本評論者，1993.
- 12) 萩原良巳・萩原清子・高橋邦夫：都市環境と水辺計画，勁草書房，1998.
- 13) 榎木義一・河村和彦編：参加型システムズ・アプローチ手法と応用ー，日刊工業新聞社，1981.
- 14) 消防庁消防課：消防力・消防水利の基準解説，1984.
- 15) 土木学会編：土木工学ハンドブック 第 63 編 3 章 水資源システム，技報堂，p.2562，1999.
- 16) 清水康生・萩原良巳・西澤常彦・渡辺晴彦：渇水時の限界節水率と給水マネジメントモデルに関する研究，水文・水資源学会 2000 年研究発表会要旨集，pp.168-169，2000.

第8章 総合的な大都市域水循環システムの再構成に関する研究

8-1 緒言

本章では、第6章と第7章で提示した水道システムと下水道システムにおける代替案を総合し、水循環システム全体を都市生活者の視座から統合することにより大都市域水循環システムとして再構成する方法論を提案する。

まず、第2章で示した再構成のコンセプトに基づき統合の概念を提示する。この概念は、大都市域水循環システムモデルを横から眺め都市生活者が各レイヤーを調整することを意味し、エシェロン構造を有するモデルとして表される。この統合モデルを適用し大都市域水循環システムを全体として調整する統合プロセスを提示する。同プロセスは、震災時における水確保と平常時の水辺創成及びシステム全体の費用を最小化するという都市生活者の論理を記述している。

以上の再構成の方法論を対象地域に適用する。本章では水道連絡管と下水処理水のトイレ用水などへの利用が有効となる期間2以降を対象として分析する。期間1については、第6章で結論として述べたように飲料水に対しては水道施設内貯留水で対応し、消防用水については第7章で述べたように水辺創成水路の水を各所で貯留して利用すると考えるためである。事例分析では、連絡管による水道水供給と平常時のアメニティ向上も考慮した下水処理水の各都市への配分結果を示すと共に、水循環ネットワークの構造安定性について考察する。これらの分析を通じて淀川大都市域において水循環システムを総合的にシステムとして捉えることの有効性を検証する。また、最後に、本研究で提案した大都市域水循環システムの再構成の方法論を現行の水管理制度と照らし合わせ制度面からみた課題について考察を行う。

8-2 大都市域水循環システムの統合モデル

8-2-1 統合の概念¹⁾

大都市域水循環システムを再構成するために以下に示すコンセプトを第2章で提示した。これらは都市生活者の視座として設定したものであり、①②の目的を実現するための手段として③が必要であることを示している。

- ①震災時における生活の維持と都市活動を可能とする
- ②平常時における大都市域の水辺創成を図る
- ③水確保のために大都市域水循環システムを一体的に考える

河川レイヤー、水道レイヤー、都市活動レイヤー及び下水道レイヤーから構成される水循環システムを統合する（coordinate）主体も都市生活者である。都市生活者が統合の調整者（coordinator）である。ここでは、都市生活者の調整者としての視点を整理する。

都市生活者は各レイヤーをマネジメントしようとするが、このことは、図 2-4 に示した大都市域水循環システムモデルを横から見て各レイヤーの機能をマネジメントしようすることに相当し、震災リスクの軽減を目的とする 1 つのエシェロン構造 (echelon)²⁾であると解釈することができる。エシェロン構造とは、

①システムが明確に認知できる相互関係をもつサブシステムで構成されている

②あるサブシステムは意思決定ユニットとして定義されている

③ある意思決定ユニットは他の意思決定ユニットによって影響を受けている

という 3 つの意味において各意思決定ユニットが階層的に配列されている構造である。そして、このようなシステムにおける各レベルをエシェロンと言う。多エシェロン構造を有するシステムは多目標システムである²⁾。

図 8-1 は、都市生活者の意思のもとで各レイヤーを通じて水供給のプロセスを制御するエシェロン構造を示している。エシェロン構造であるから各サブシステムは、個別の目的を有している。これらが全体を統合する都市生活者にとって最適となるように調整されることになる。

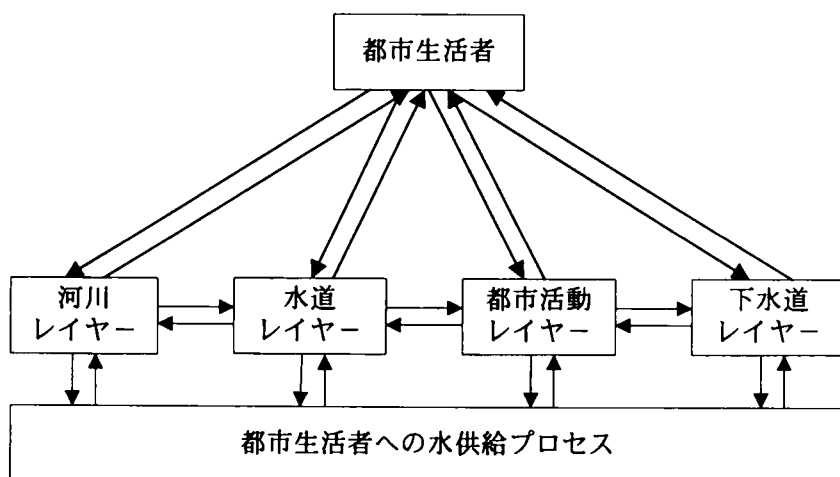


図 8-1 エシェロン構造を有する統合モデルの概念

以下に各レイヤーに対して都市生活者が何を望むか、また、各レイヤーのサブシステムとして実行可能な代替案を整理した。これらの内容がレイヤー間で調整されることになる。

(1) 都市生活者（調整者）の論理

①震災時における都市生活者の水確保と平常時の水辺創成

第 6 章の分析から明らかであるように、震災直後の 3 日間（期間 1）においては水道事業体が他の事業体との提携を前提としても被災により連絡管を活用できない状況である。このため、水道事業体としては、施設内貯留に頼らざるを得ない。これは水道レイヤーだけで講じる対策の限界である。

一方、この状況下でも例えば、都市活動レイヤーに位置付けられた水辺創成水路の流水と水路各所に設けられた処理水の都市内貯留施設は有効に利用することが可能である。こ

のように、水道レイヤー、都市活動レイヤー、下水道レイヤー及び河川レイヤーで実行可能な代替案を組み合わせ、震災時の必要水量を確保できるようにすることが必要である。以下の(2)～(5)に具体的な内容を説明する。

②全体システムの費用最小化

水道レイヤーで講じられる連絡管や施設内貯留施設などの対策に要する建設・維持管理費用は、水道料金・税金として最終的には都市生活者から徴収される。下水道施設の場合も同様である。都市生活者の負担を軽減するためには、全体費用を最小化する必要がある。ただし、費用の最小化に関しては対象とする計画のレベルにより注意する必要がある。すなわち、長期的な構想計画や基本計画のレベルである場合、全体コストは強い制約とはせず、コストの議論は、計画が整備計画・事業化計画・事業実施計画³⁾と具体化されるに伴ってその重要性を増す点である。

(2) 水道レイヤー（水道管理者）

都市生活者は、震災時でも水道施設が機能するよう耐震化を望むが、この耐震化を全ての施設に対して行うことはその費用を考えるならば現実的でなく、たとえ耐震化しても100%被災しない保証はない。このように耐震化には限界がある。

一方、施設内貯留施設の整備は、震災直後から確実に水道水を利用できる有効な対策である。また、震災被害の広域性を考えた時、広域的な水道事業体間の連絡管は被災していない地域からの水供給を可能とする。被災後の混乱や水源汚染の収まる期間2以降（被災後4日目以降）になり連絡管からの供給水を受け入れる準備が整ったならば、連絡管から供給される水は、被災地の生活者にとって飲料水のみならずトイレ用水・洗濯用水などの生活用水として有効である。水道事業体にとっても管路の復旧用水として平常時以上の水量が必要な時期であるため有効な水である。

このような連絡管による水供給は、広域的に水道事業体の全体提携が成立している場合には全ての事業体で可能であるが、第6章の分析では事業体が自分の事業体だけの費用最小化を目指す全体提携が成立しないことがわかっている。全体の被害を軽減するためには、全事業体が互いに助け合うことが求められる。

さらに、水道施設内貯留水の利用は、被災後の混乱期（3日間）の飲料水の確保に有効である。ただし、この時期に重要である消防用水の確保は水道が断水した時点で消火栓が機能しなくなり、かつ水道の施設内貯留水で消防用水を全て賄うのは不可能と考えられるため、消防水利としての水道システムは全く機能しない。

(3) 都市活動レイヤー（都市生活者）

生活を維持し都市活動を行うために、都市生活者は水道水をできるだけ有効に利用することを考え、水質レベルの低い水使用用途（トイレ用水や洗浄用水など）に対しては、水辺創成水路の下水処理水や河川水で代替しようとするであろう。また、水辺創成水路の各所に設けられた都市内貯留施設に存在する処理水は、震災直後に発生する火災に対して消防用水として有効に利用することができる。消火栓が使用できず、かつ水辺の少ない都

市域では、都市内貯留施設に貯留された下水処理水は極めて重要な消防水利であると言える。震災という非常時において、都市生活者は水道水の使用用途を限定した有効な水配分を行うと考える。

また、水道連絡管によって直接被害区域や間接被害区域へ水供給を行う時、給水影響区域では都市生活者が節水することにより平常時使用水量の 30% までを被害区域へ手当てすることを許容すると考える（表 6-2 参照）。他の事業体からも水利権や施設能力の余裕の範囲で水供給を行う。

都市生活者は、このように水利用を工夫すると共に大都市域という共通の水利用圏に生活する都市生活者と助け合い、生活の維持を図ると考える。

(4) 下水道レイヤー（下水道管理者）

震災直後に発生する火災に対する消防用水やトイレ用水として、都市生活者は下水処理水を利用するであろう。この点を考えた水辺創成水路は第 7 章で分析したが、水路により都市へ処理水を送水できる処理場は限られている。これは、経済的な効率を優先して、下水処理場を流末や地盤の低い場所に建設してきた結果である。しかし、送水が可能な経路においては、震災時に処理水を大量に確保できるよう経路上に都市内貯留施設として随所に処理水の取り出し施設を設けることができる。このことにより被災直後の消防用水のみならず、都市生活者自身が取水しトイレ用水等へ利用することが可能である。

一方、平常時には都市活動の維持のために都市生活のアメニティ向上を図ることが重要である。同時にこのことが普段から都市生活者に水辺を利用するという習慣付けの動機になり、震災時にその水を何らかの用途に利用することは容易に思い及ぶはずである。この意味でも平常時の水辺を都市生活者にとって親しみのある場としておくことが重要である。水辺創成水路の水は、どのように利用されたかにより再び下水処理場へ流入する場合もあるが、そのまま河川へ流出する場合もある。すなわち、環境創成を目的として送水された時点で、用水は下水道管理者（下水道レイヤー）の手を離れ都市活動レイヤーに位置付けられる水である。

(5) 河川レイヤー（河川管理者）

水道が断水し施設内貯留水や都市内貯留水（下水処理水）も不足したならば、都市生活者は身近な河川から水を得ようとするであろう。ただし、河川水は飲料水としては不適であり使用用途がトイレ用水や洗濯用水などに限定される。

また、水道事業体の立場で考えたならば、水道の取水施設が被災した時に河川管理者や工業用水、農業用水の管理者と調整した上で水道取水口の近くにある工業用水や農業用水の取水施設を利用すればよい。これら取水施設を利用し取水した水をポンプで水道の取水場もしくは浄水場に直接導水することが考えられる。阪神・淡路大震災では、神戸市が工業用水の取水施設・導水管を利用した事例がある。

さらに、震災により水環境汚染が発生した場合に河川管理者は、水道取水に影響を及ぼさないよう早期に流下させるなど対策が必要である。ただし、第 5 章で指摘したように大

阪湾の汚染とのトレードオフの問題を生じる。取水施設と同時に水利権を一時的に転用し汚染の発生していない上流から取水することも考えられよう。

8-2-2 統合プロセス

前項で述べた水道レイヤー、下水道レイヤー及び都市活動レイヤーを対象とした統合モデルの構成について説明する。ただし、河川レイヤーについては、工業用水や農業用水を本研究の対象としなかったため河川管理者としての代替案を記述できない。このため河川レイヤーを調整の対象から除くことを断っておく。

統合プロセスは、生活用水として水道用水と下水処理水の代替が可能な期間2以降を対象として提示する。期間1で必要となる消防水利は、期間2以降を対象とした分析の結果得られる送水量の多寡に関わりなく経路上に都市内貯留施設を設けることにより確保することが可能であるためである。従って、期間2以降だけを対象として統合モデルを適用しても消防用水は確保される。

以上の条件より統合プロセスは図 8-2 として示される。同図には前項で説明した各レイヤーの代替案を都市生活者の論理で相互に調整するために、5つの調整モデルが示されている。MODEL 1～4は第6章・第7章で説明された分析モデルを全体システムの中で位置付けたものであり、MODEL 5は各モデルから得られる結果を全体として費用最小となるよう調整するモデルである。以下に各 MODEL を説明する。

MODEL1: 水道事業体が全体提携について合意していると仮定し、全ての事業体が必要水量を確保することを条件とし、全体費用を最小化した連絡管配置と口径を決定する線形計画モデルである。入力、各事業体における水道水の必要水量である。この必要水量は、水道水として求められる水量であり、トイレ用水など下水処理水で代替された分の水量は除かれる。出力は、事業体の必要水量を全て確保する費用最小の連絡管配置である。

MODEL2: 費用最小で必要水量を確保するという個別事業体の論理を優先し、各事業体が必要水量を確保するために取り得る部分提携の可能性を分析するゲーム理論を適用したモデルである。提携相手を探す時に片方の事業体が提携を望めば“助け合う精神”で提携が成立すると考えるモデルである。入力、各事業体における必要水量である。出力は、全体提携が成立する場合の提携過程とどの事業体が費用的に譲歩する必要があるかが明らかとされる。

MODEL3: 震災時に各都市が必要とする下水処理水量に対して、各処理場でどれだけの処理水を再利用する必要があるかを決定するモデルである。必要水量と配分水量の乖離が最小となるよう目的関数を設定し、都市が必要とする以上に処理水を配分しないことを制約とした線形計画モデルである。入力、各都市において処理水を水道水の代替として利用可能なトイレ用水などの必要水量である。出力は、各処理場において水辺創成水路へ利用される処理水量である。

MODEL4: 各処理場で利用される処理水量を平常時のアメニティ向上を考慮してどのよう

に各都市に配分するかを決定するモデルである。水辺創成水路周辺からの誘致人口が多いほどアメニティ効果が高いと考え、アメニティが最大となるように処理水を各都市に配分する。各都市の震災時の必要水量からの乖離を調整定数の許す範囲で許容することを制約条件とする線形計画モデルである。入力、各処理場での処理水の利用量と水辺創成水路（経路毎）のアメニティ効果（誘致人口）である。出力は、震災時の必要水量が調整定数の許容限度内で確保されかつ水辺創成によるアメニティを最大にする各都市への下水処理水の配分量である。この MODEL は、都市生活者の観点（生活の維持と都市活動）から震災時だけでなく平常時のアメニティをも考えて処理水の配分を行うモデルであり、都市活動レイヤーに位置付けるものとする。

MODEL5: MODEL 4 で得られた水辺創成水路の下水処理水量を上限として処理水を都市生活者がトイレ用水などに利用することにより、水道水の必要水量の一部が処理水に代替されると仮定する。水辺創成水路の建設費と水道連絡管の建設費の合計が最小となるように連絡管による水道水の配分を決定する線形計画モデルである。入力、各都市の処理水の利用可能量の上限と水道水の必要水量である。出力は、利用される処理水と連絡管による水道水の確保水量及びその時の連絡管の配置である。

次に、以上の MODEL を使った統合プロセスについて説明する。同プロセスでは、各レイヤー（サブシステム）で部分的な最適化を行い、その結果を都市生活者が調整して各レイヤーに戻し、各レイヤーは再び最適化を行う。このような手順を次に示す評価基準を満たし、全体費用が最小化されるまで行うものとする。

水道レイヤー：水道事業体の全体提携の成立

下水道レイヤー：水辺創成水路に送水する防災・減災用水としての下水処理水の確保

都市活動レイヤー：確保された処理水のアメニティを考慮した都市への最適配分

都市生活者（調整者）：全体システムの費用最小化

この統合プロセスを図 8-2 に沿って以下に説明する。

STEP1：水道レイヤーの最適化

水道事業体が総論として全体提携に賛成すると仮定し、連絡管の建設費用を最小化する線形計画問題の解を求める（MODEL1）。次に全体提携が成立するか否か事業体の立場からその可能性を分析する（MODEL2）。ただし、MODEL2 で説明したように自分の事業体だけの費用最小化を目指すことなく全ての事業体で必要水量を確保できるよう譲歩を求めなければならない事業体が存在する。MODEL2 でこのような事業体を明らかとする。事業体は、“全事業体が助け合う”精神に基づき提携を了承すると考える。このステップでの出力は、全事業体が合意した連絡管配置とその口径である。

STEP2：下水道レイヤーの最適化

水辺創成モデルは第 7 章で述べたように非線形式を線形化して 2 段階に分けて解いている。まず、最も重要な震災時を想定し都市生活者が必要とするトイレ用水などを確保するため各処理場でどれだけの処理水を利用する必要があるかを MODEL3 を適用して算出す

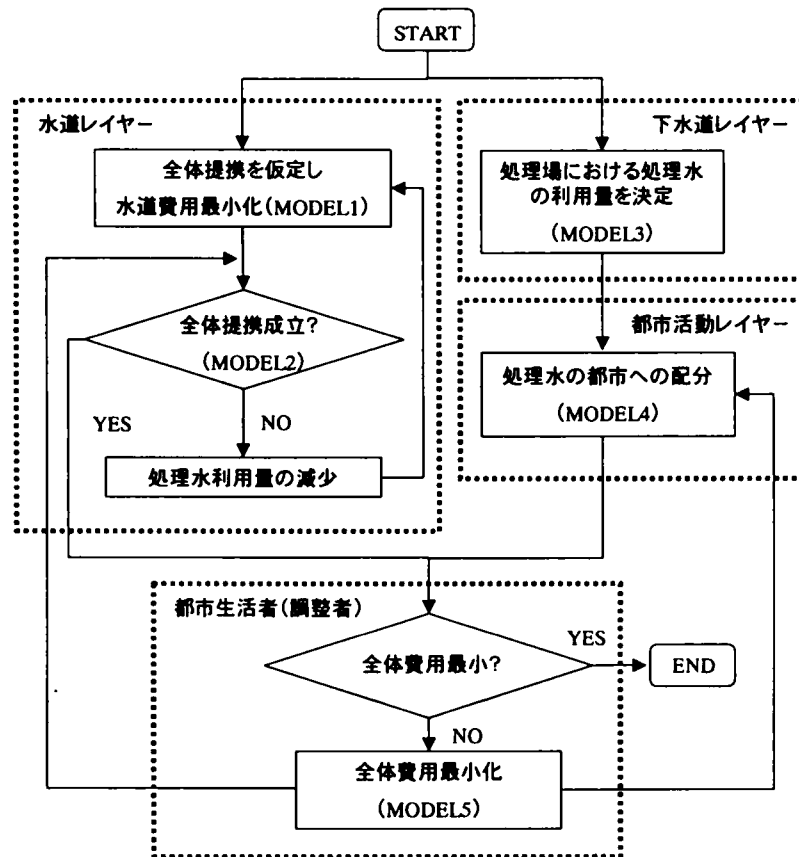


図 8-2 統合プロセス

る。震災時に備える下水処理水の全利用水量は下水道レイヤーで決定する。

STEP3：都市活動レイヤーの最適化

STEP2 で得られる各処理場の処理水の利用量をアメニティ効果ができるだけ高くなるよう各都市への配分する (MODEL4)。この配分をどのように行うかにより、都市生活者や都市活動にとってのアメニティは違ってくる。コンセプトで掲げた震災時の水確保と平常時のアメニティ向上については、このステップの MODEL4 で調整される。調整結果として、各下水処理場から各都市へ送水される処理水量が出力される。

STEP4：全体システムの最適化

STEP1 で明らかとなっている各都市の必要水量を水道用水だけで賄うのではなく、STEP3 で得られた下水処理水量を上限として利用することとし、「連絡管の建設費用」と「水辺創成水路の建設費用」の合計が最小化されるよう、水道水と処理水の利用水量を決定する問題を解く (MODEL5)。出力は、各都市の水道用水として確保する水量 (連絡管配置とその口径) と水辺創成水路による処理水として確保する水量である。ここで出力された水道用水の必要量を水道レイヤーに返し、処理水の利用量を都市活動レイヤーに返す。

STEP5：水道レイヤーの最適化 (2 回目以降)

水道用水として確保する必要水量に対して全体提携が成立するか否かを分析する

(MODEL2)。成立する条件（譲歩する事業体）を明らかとし、全体提携が成立すると考え、その時の解を都市生活者に返す。処理水を利用すると事業体の水道水の必要水量が減少するため、提携を必要とせず全体提携が成立しない可能性がある。この場合には、水道水だけの水供給により全体提携が成立することが第6章の分析結果からわかっているため、全体提携が成立するまで処理水の利用量を減らす。都市生活者への出力は、入力されたと同じ水道用水の利用量または処理水を減らした分だけ増加させた水道用水の利用量である。何れにしろ水道事業体の全体提携は重要であると考えその成立を保証する。

STEP6：都市活動レイヤーの最適化（2回目以降）

各都市に必要とされた下水処理水量を送水元の処理場毎に集計し、再び都市生活者のアメニティ向上の立場に立って処理水の各都市への配分量の決定を行う（MODEL4）。出力されるのは、各都市への下水処理水の再配分量である。

STEP7：全体システムの最適化（2回目以降）

STEP6 で得られた処理水を送水するための水辺創成水路の費用を算出し、STEP5 で得られた連絡管の建設費と合わせて総費用を算出する。この費用が1ステップ前の総費用以下であれば全体システムがサブシステムと共に目的を達したと判断し統合プロセスは終了とする。費用が高くなった場合には MODEL5 によって再度全体費用の最小化を行う。

8-2-3 統合モデルの定式化

前項で提示した都市生活者の観点から行う全体費用最小化モデル（MODEL5）の定式化を行う。

(1) 制約条件の定式化

第6章で示した各区域の水量に関する制約条件式（6.17）は、供給水量が不足水量と等しいかそれを上回らなければならないというものである。ここでは期間2以降を対象としているため同式の施設内貯留の項を省略し、下水処理水の利用による項 W^k を付加することによって制約式（8.1）を得る。同式の左辺第1項は連絡管により得る水量を第2項は下水処理水の利用によって得る水量である。右辺は不足水量を表している。ただし、下水処理水の利用可能量については、式（8.2）で示される利用可能量の上限が制約となる。

$$A^k X^k + W^k \geq H^k \quad (8.1)$$

$$W^k \leq W_o^k \quad (8.2)$$

A^k ：活断層 k ・期間 t の管路の接続関係を示すマトリクス

X^k ：活断層 k ・期間 t の各連絡管を流れる水量を表すベクトル

H^k ：活断層 k ・期間 t における不足水量を表すベクトル

W^k ：活断層系 k 想定時の下水処理水の利用量を表すベクトル

W_o^k ：活断層系 k 想定時の下水処理水の利用可能量の上限を表すベクトル

(2) 目的関数の定式化

第6章では、水道連絡管と施設内貯留に関する費用最小化の目的関数 Z を式 (6.19) として与えたが、同式に水辺創成水路の建設費用を表す項を付加する。すなわち、目的関数に、水辺創成水路の単位長さ当たりの費用を出力する関数を $c_r(w_{pq}^k)$ として付加する。

$$z = \sum_{j=1}^M c_j(|x_j^k|)l_j + \sum_{p=1}^n \sum_{q=1}^r c_r(w_{pq}^k)l_{pq}^k \rightarrow \min \quad (8.3)$$

w_{pq}^k : 活断層系 k 想定時の区域 p における水路 q による下水処理水の利用量

l_{pq}^k : 活断層系 k 想定時の区域 p 内の水辺創成水路 q の延長 (水路数を r とする)

(3) 複数の活断層系を対象とした定式化

図 8-2 に示す統合プロセスにおいて、複数の活断層系を考慮する必要がある。MODEL5 の場合は第6章の式 (6.23) ~ 式 (6.27) に下水処理水の項を付加することにより定式化される。すなわち、制約条件には、下水処理水の供給量の項 W^I を追加し、目的関数には、水辺創成水路の単位長さ当たりの費用を出力する関数 $c_r(w_{pq}^I)$ を付加する。制約条件と目的関数は以下のとおりであり、求解プロセスは図 6-2 と同様である。

[制約条件]

$$A^I X^I + W^I \geq H^I \quad (8.4)$$

$$|x_j^I| \leq x_j^* \quad (j \notin S) \quad (8.5)$$

$$x_j^I, x_j^{I'} \geq 0 \quad (\text{一方向利用の時}) \quad (8.6)$$

$$W^I \leq W_o^I \quad (8.7)$$

$$I = \{k, t \mid \max_{k,t} x_L^k\} \quad (8.8)$$

[目的関数]

$$z = \sum_{j \in S} c_j(|x_j^I|)l_j + \sum_{p=1}^n \sum_{q=1}^r C_r(w_{pq}^I)l_{pq}^I \rightarrow \min \quad (8.9)$$

8-3 対象地域における事例分析

8-3-1 統合モデルによる水循環システムの再構成

前節で提示した統合モデルを対象地域に適用する。統合の対象とするレイヤーは水道レイヤーと下水道レイヤー及び都市活動レイヤーとする。

(1) 統合のための前提条件

水道レイヤー、下水道レイヤー及び都市活動レイヤーに関する前提条件は第6章と第7章と同様である。統合を調整する都市生活者の論理に関する条件として、本研究は長期的な構想計画であるため、全体費用は制約としない。すなわち、利用可能な下水処理水を全量トイレ用水などに利用した場合に、水辺創成はどこの都市で可能であるか、処理水を利

用しない場合と比較して連絡管の口径をどこまで縮小できるかについて出力する。対象とする期間は、期間2と期間3である。

(2) 対象地域における水辺創成

対象地域において各都市代表点に対する下水処理水の配分水量を計算した結果を表8-1に示す。同表より、送水元の処理場と送水先の都市を整理すれば以下のとおりである。

表8-1(1) 水辺創成水路による下水処理水の送水量の決定（淀川右岸流域・公共）

活断層系	処理場→市	アメニティ効果 (人)	H ₂ O用水 必要水量 (m ³ /日)	震災時を想定した場合				平常時を想定した場合		
				X ^B の値 (初期値)	X ^a の値	送水量 (m ³ /日)	充足率	X ^B の値 (決定値)	送水量 (m ³ /日)	充足率
西山	正雀処理場→高槻市	400,018	1,139	1.00	0.03	1,139	1.00	1.00	1,139	1.00
有馬高槻	原田処理場→吹田市	408,645	9,542	1.00	0.12	9,542	1.00	1.00	9,542	1.00
生駒	正雀処理場→高槻市	400,018	8,875	0.90	0.25	8,875	1.00	0.91	8,976	1.01
	正雀処理場→摂津市	159,148	1,011	0.10		1,011	1.00	0.09	910	0.90
上町	原田処理場→吹田市	408,645	8,245	1.00	0.02	8,245	1.00	1.00	8,245	1.00

表8-1(2) 水辺創成水路による下水処理水の送水量の決定（淀川左岸他公共）

活断層系	処理場→市	アメニティ効果 (人)	H ₂ O用水 必要水量 (m ³ /日)	震災時を想定した場合				平常時を想定した場合		
				X ^B の値 (初期値)	X ^a の値	送水量 (m ³ /日)	充足率	X ^B の値 (決定値)	送水量 (m ³ /日)	充足率
西山	郡津処理場→枚方市	415,551	3,954	1.00	0.27	3,954	1.00	1.00	3,954	1.00
有馬高槻	田原処理場→枚方市	439,031	13,520	0.90	1.00	2,386	0.18	1.00	2,541	0.19
生駒	北部処理場→守口市	309,654	1,825	0.08	0.39	1,825	1.00	0.07	1,643	0.90
	北部処理場→寝屋川市	334,131	10,338	0.45		10,338	1.00	0.50	11,372	1.10
	北部処理場→大東市	260,670	5,154	0.22		5,154	1.00	0.20	4,639	0.90
	北部処理場→門真市	316,822	5,620	0.25		5,620	1.00	0.23	5,284	0.94

表8-1(3) 水辺創成水路による下水処理水の送水量の決定（淀川左岸公共）

活断層系	処理場→市	アメニティ効果 (人)	H ₂ O用水 必要水量 (m ³ /日)	震災時を想定した場合				平常時を想定した場合		
				X ^B の値 (初期値)	X ^a の値	送水量 (m ³ /日)	充足率	X ^B の値 (決定値)	送水量 (m ³ /日)	充足率
上町	放出処理場→都島区	151,830	3,922	1.00	0.03	3,922	1.00	1.00	3,922	1.00

表8-1(4) 水辺創成水路による下水処理水の送水量の決定（大和川流域・公共）

活断層系	処理場→市	アメニティ効果 (人)	H ₂ O用水 必要水量 (m ³ /日)	震災時を想定した場合				平常時を想定した場合		
				X ^B の値 (初期値)	X ^a の値	送水量 (m ³ /日)	充足率	X ^B の値 (決定値)	送水量 (m ³ /日)	充足率
上町	狭山処理場→堺市	905,967	14,377	0.88	0.55	14,377	1.00	0.89	14,575	1.01
	狭山処理場→松原市	197,371	1,875	0.11		1,875	1.00	0.10	1,688	0.90
	狭山処理場→美原町	46,103	100	0.01		100	1.00	0.01	90	0.90

表8-1(5) 水辺創成水路による下水処理水の送水量の決定（武庫川流域・公共）

活断層系	処理場→市	アメニティ効果 (人)	H ₂ O用水 必要水量 (m ³ /日)	震災時を想定した場合				平常時を想定した場合		
				X ^B の値 (初期値)	X ^a の値	送水量 (m ³ /日)	充足率	X ^B の値 (決定値)	送水量 (m ³ /日)	充足率
有馬高槻	枝川浄化センター→尼崎市	523,490	560	1.00	0.004	560	1.00	1.00	560	1.00
六甲	枝川浄化センター→尼崎市	523,490	560	1.00	0.004	560	1.00	1.00	560	1.00

淀川右岸の高槻市では、西山断層系の震災を前提とした場合に吹田市の正雀処理場から1,139m³/日を、生駒断層系の場合に8,976m³/日の送水を受けることにより震災時必要水量を基準とした充足率は1.00以上となる。生駒断層系で震災を想定した場合には、高槻市に8,875m³/日が送水されることとなるが、平常時のアメニティ効果を考慮した処理水の配分では、摂津市よりも高槻市へ送水する経路の方が水辺創成水路を建設するアメニティ効果が高いため（摂津市約16万人に対し高槻市約40万人）、震災時に摂津市に送水する水量

101 m³/日分が高槻市に送られる。従って、高槻市は正雀処理場から 8,976m³/日の処理水を受けることとなる。このため、同市の充足率は 1.00 から 1.01 となる。摂津市は、その分の送水量が減少する結果となる。同様に吹田市は、原田処理場（流域下水道）から有馬高槻断層系を前提とした時の 9,542 m³/日の送水を受ける。摂津市は、生駒断層系を前提として正雀処理場から 910 m³/日を受けることとなる。

淀川左岸地域の枚方市は、西山断層系を前提として郡津処理場から 3,954 m³/日を、有馬高槻断層系に対して田原処理場から 2,541 m³/日の送水を受ける。枚方市は、2つの下水処理場からの送水を受け、平常時の全送水量は 6,495 m³/日となる。枚方市の北部処理場は、生駒断層系を前提として守口市（1,643 m³/日）、寝屋川市（同 11,372）、大東市（同 4,639）、門真市（同 5,284）の4都市に送水する。この地域では北部処理場から寝屋川市に送水することによるアメニティ効果が高く、同市への送水量の充足率は 1.10 となる。

淀川左岸の大阪市では、上町断層系の場合には放出処理場から都島区へ 3,922m³/日が送水される。大阪市内には、12の下水処理場が存在するが、地盤高が低い位置に立地しているため処理水を利用できる処理場は放出処理場のみである。

大和川左岸では、上町断層系を想定した時、狭山処理場から堺市へ 14,575m³/日が送水され、松原市（1,688 m³/日）と美原町（同 90）にも送水されることとなる。堺市、松原市、美原町を比較すると、堺市へ送水するアメニティ効果が大きいため、堺市の充足率は 1.01 となり、松原市と美原町は調整限度まで充足率が減少している。

西宮市の枝川浄化センターは、有馬高槻断層系と六甲断層系を前提としたとき、尼崎市に対して充足率 1.00 に相当する 560 m³/日を送水することとなる。

以上説明した下水処理場から各都市の代表点までの水辺創成経路を図 8-3 に示す。

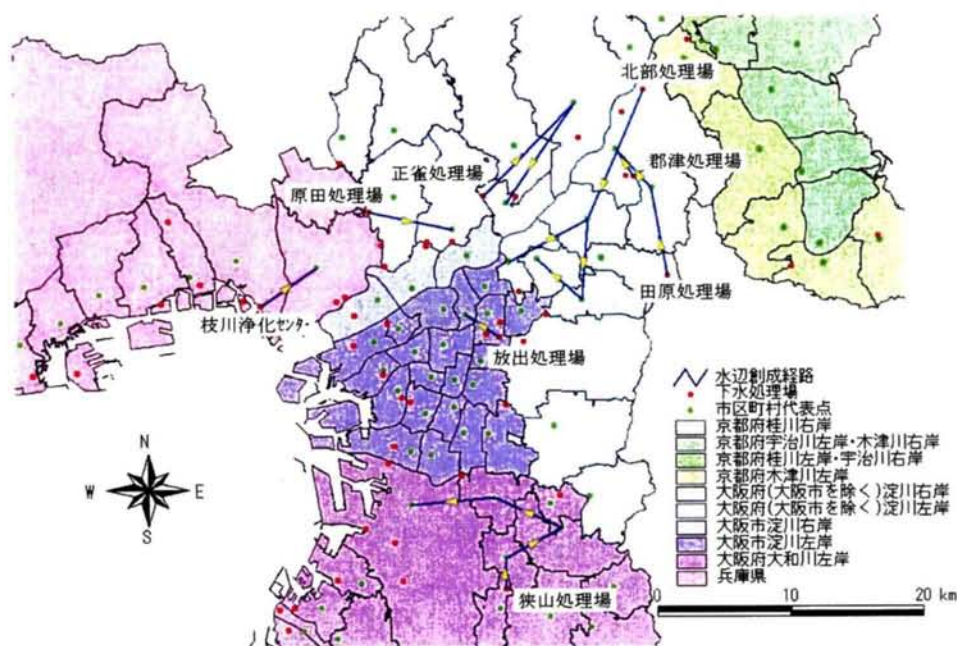


図 8-3 水辺創成水路（下水処理場から都市代表点）

下水処理場から各都市へ送水される処理水量を考慮し、震災想定時の各場面における不足水量を算出する。この際、想定した処理水の全量が各場面で利用されると仮定する。高槻市の場合、正雀処理場から平常時には 8,976 m³/日が送水されているが、生駒断層系の震災時には 8,875 m³/日（充足率 1.00 に相当）を利用し、西山断層系の震災時にはこの内の 1,139 m³/日を利用すると仮定する。吹田市の場合も同様に有馬高槻断層系と上町断層系の震災で処理水が必要となるため充足率 1.00 に相当する各送水量を利用するものとする。このように水辺創成水路の処理水を利用した結果、震災時の不足水量は表 8-2 となる。同表では、下水処理水を利用しない場合を表した表 6-3 から不足水量が減少した箇所を太数字で示している。不足水量が改善されるのは、大阪府営水道・大阪市水道・阪神水道企業団の 3 つの事業体である。

表 8-2 に示した条件で水道事業体の全体提携を仮定し必要となる連絡管のルートと口径を算出した結果を図 8-4 に示す。連絡管により全ての事業体が結ばれており、水道事業体が全体提携することの必要性を裏付けている。

The diagram illustrates the layout of the Osaka Metropolitan Area Wastewater Treatment Plant (OSWTP) with six treatment plants (1-6) and their interconnecting pipes. The pipes are labeled with diameters (φ) and types (solid line for '設置連絡管' - Installation Connection Pipe, dashed line for '不要' - Not Required).

- Plant 1:** 京都市水道 (Kyoto City Waterworks)
- Plant 2:** 京都市営水道 (Kyoto City Operated Waterworks)
- Plant 3:** 大阪府営水道 (Osaka Prefecture Operated Waterworks)
- Plant 4:** 大阪市水道 (Osaka City Waterworks)
- Plant 5:** 阪神水道企業団 (Hanshin Waterworks Enterprise Group)
- Plant 6:** 神戸市水道 (Kobe City Waterworks)

Legend:

- 設置連絡管 (Installation Connection Pipe) - Solid line
- 不要 (Not Required) - Dashed line

Connections and Pipe Diameters:

- Plant 1 to Plant 2: φ 1800 (solid), φ 1650 (dashed)
- Plant 2 to Plant 3: φ 1800 (solid), φ 1600 (dashed)
- Plant 3 to Plant 4: φ 600 (solid)
- Plant 4 to Plant 5: φ 500 (solid)
- Plant 5 to Plant 6: φ 1500 (solid)
- Plant 5 to Plant 3: φ 600 (solid)
- Plant 5 to Plant 4: φ 1500 (dashed), φ 1650 (dashed)

155

表 8-2 下水処理水の利用を考慮した場面別の不足水量

期間	事業体	花折断層		西山断層		有馬高根断層		生駒断層		上町断層		六甲断層	
期間 1	京都市水道	直	間 (西側)	給	直	給	直	無	無	無	無	無	無
		-3,624	-897	606,584	-299	579,757	-55	369,628		369,628		369,628	
	京都府水道	無		給	直	給	直	無	無	無	無	無	無
		29,978		64,477	-101	63,977	-95	29,978		29,978		29,978	
	大阪府水道	間		間 (西側)	直	間 (西側)	直	間 (西側)	直	直 (北側)	直 (南側)	無	無
		-13,610		-13,492	-117	-2,877	-3,163	-4,127	-5,213	-631	-1,202	535,797	
	大阪市水道	間		間		間		間		直	間	無	無
		-11,820		-11,820		-11,820		-11,820		-6,283	-2,375	914,482	
	阪神水道	間		間		間	直	間		952,086		給	直
		-2,200		-2,200		-1,603	-597	-2,200		-2,200		808,989	-565
期間 2	神戸市水道	給		給		直	給	給		給		直	給
		221,013		221,013		-1,362	70,374	221,013		221,013		-3,468	107,781
	京都市水道	直	間 (西側)	給	直	給	直	無	無	無	無	無	無
		-250,704	-5,698	606,584	-25,456	579,757	-4,663	369,628		369,628		369,628	
	京都府水道	無		給	直	給	直	無	無	無	無	無	無
		29,978		64,477	-6,006	63,977	-5,618	29,978		29,978		29,978	
	大阪府水道	無		給	直	給	直	給	直	直 (北側)	直 (南側)	無	無
		535,797		1,046,012	-2,400	184,359	-201,045	48,949	-250,142	-34,631	-44,305	535,797	
	大阪市水道	無		給		給		給		給		無	無
		914,482		919,137		919,137		919,137		952,086	-11,527	914,482	
期間 3	阪神水道	無		無		給	直	無	無	間		給	直
		155,537		155,537		811,516	-41,875	155,537		-14,665		808,989	-39,880
	神戸市水道	無		無		直	給	無	無	給		直	給
		324,548		324,548		-89,900	53,814	324,548		197,751		-210,513	2,169
	京都市水道	直	間 (西側)	給	直	給	直	無	無	無	無	無	無
		-476,829	-71,223	606,584	-48,417	579,757	-8,870	369,628		369,628		369,628	
	京都府水道	無		給	直	給	直	無	無	無	無	無	無
		29,978		64,477	-13,536	63,977	-12,790	29,978		29,978		29,978	
	大阪府水道	無		給	直	給	直	給	直	直 (北側)	直 (南側)	無	無
		535,797		1,046,012	-11,471	-30,018	-442,871	48,949	-572,554	1,197,822	-65,128	535,797	
期間 3	大阪市水道	無		無		無		給		給		無	無
		914,482		914,482		914,482		919,137		952,086	-144,088	914,482	
	阪神水道	無		無		給	直	無	無	無		給	直
		155,537		155,537		234,835	-57,838	155,537		155,537		232,308	-43,194
期間 3	神戸市水道	無		無		直	給	無	無	無		直	給
		324,548		324,548		-182,622	363,837	324,548		324,548		-427,633	578,850

注 1 : 表中の「直」は直接被害区域、「間」は間接被害区域、「給」は給水影響区域、「無」は無被害区域を示す。
 注 2 : 水量単位は m³/日。マイナスは不足水量を意味する。太数字は下水処理水の利用により不足水量が改善されていることを示す。
 注 3 : 網のかかった箇所は、給水影響区域だが許容限度供給量 (70%) を満たさないため、間接被害区域の必要水量で評価した結果である。
 注 4 : 期間 2以降で 2 重線に囲まれた場面では、事業体内で幹線管路が復旧するため不足水量を解消できることを示す。

一方、表 8-2 の条件により個別事業体の立場から提携の可能性を分析した結果、全体提携の成立することが確認された。以上の結果は、水量全体からみれば多くないが震災時の必要水量として下水処理水を有効に利用しうること及び平常時にも処理水がアメニティ向上のために有効に利用できることを端的に表している。各レイヤーの統合により大都市域の水循環が都市生活者の震災時の水確保と平常時のアメニティ向上に対してシステムとして機能していることを意味していると言えよう。この点は意義があり強調したい。

ただし、本研究では、水辺創成水路の利用に関して大河川や府県境を越えないと仮定した。このため上流部に位置する京都市や京都府の下水処理場が当該行政区域の流末に位置するため、その処理水が全く利用されない結果となった。下水処理場が地盤の低い場所や流末に配置されていることは処理水の再利用にとって大きな制約となることを第 7 章でも指摘した。このような現状をふまえ、上記の仮定を除いた大河川や府県境を越えた場合の利用については課題としたい。

8-3-2 ネットワーク構造安定性の評価

第 7 章で有効であった冗長なパスの数と内素なパスの数を指標としてネットワーク構造安定性の評価を行う。ただし、パスの上流端は河川取水口をノードとし下流端は都市代表点とした。また、この都市代表点は給水点と同一ノードとみなしている。

水道事業体が提携して連絡管を設置するため、各事業体への水供給の経路は増加する。このパスの増加数は各事業体で表 8-3 のとおりである。大阪府営水道へのパスが大きく増加しているが、これは同水道が地震の影響を受けやすい場所に位置し、かつ他の水道事業体からの連絡管による水供給を受けやすい位置に立地しているためである。また、震災時に水供給を必要としない京都府営水道の供給パスは変化していない。しかし、連絡管は京都市と大阪府の両方に設けられており、水供給を中継する役割を有している。

次に、水辺創成水路の導入により増加したパスの数を表 8-4 に示す。吹田市と堺市・松原市・美原町で冗長なパスの数が大きく増加しているが、これは複数の都市からの汚水を引き受けている流域下水道処理場からの処理水を水辺創成水路の水源として利用しているためである。表 8-3 に示す供給区域内の表 8-4 に示す都市では、同表に示すパスの数だけさらに大都市域水循環システムを構成する要素の繋がりが緊密になっており、ネットワークの構造安定性が高まっていることを表している。

表 8-3 水道事業体の提携による水供給パスの増加

水道事業体	内素なパス	冗長なパス	利用される場面（震災）
京都市水道	+1	+3	花折断層系
京都府営水道	変化なし	変化なし	—
大阪市水道	+1	+1	上町断層系
大阪府営水道	+4	+6	有馬高槻断層系・生駒断層系
神戸市水道	+1	+1	有馬高槻断層系・六甲断層系
阪神水道企業団	+1	+1	上町断層系

表 8-4 水辺創成による水供給バスの増加

区域	水源の下水処理場	内素なバス	冗長なバス
大阪市（淀川左岸公共）	放出処理場	都島区（+1）	都島区（+1）
大阪府（淀川右岸流域・公共）	原田処理場（流域下水道）	吹田市（+2）	吹田市（+9）
	正雀処理場		
	正雀処理場	摂津市（+1） 高槻市（+1）	摂津市（+2） 高槻市（+2）
大阪府（淀川左岸流域・公共）	田原処理場	枚方市（+2）	枚方市（+2）
	郡津処理場		
	北部処理場	守口市（+1） 寝屋川市（+1） 大東市（+1） 門真市（+1）	守口市（+1） 寝屋川市（+1） 大東市（+1） 門真市（+1）
大阪府（大和川流域・公共）	狭山処理場（流域下水道）	堺市（+1） 松原市（+1） 美原町（+1）	堺市（+3） 松原市（+3） 美原町（+3）
兵庫県（武庫川流域・公共）	枝川浄化センター	尼崎市（+1）	尼崎市（+1）

注：表中の兵庫県は、阪神水道企業団の供給区域に相当している。

8-4 水管理に関する制度面からの考察

本研究で提案している内容に係る下記の項目について現状の水管理制度がどのようなものであるか整理し、大都市域水循環システムを再構成するに際して制度面において留意すべき事項を明らかにする。

①震災時における水道事業体間の協力体制について

②広域的な水道整備について

③下水処理水の利用について

④下水処理水の放流量と河川流量について

(1) 震災時における水道事業体間の協力体制について⁴⁾

水道法第 40 条では水道用水の緊急応援について規定している。第 1 項では、都道府県知事は、災害時に緊急に水道用水を補給することが必要であると認めるときは、水道事業者または水道用水供給事業者に対して、期間、水量及び方法を定めて、水道施設内に取り入れた水を他の水道事業者または水道用水供給事業者に供給すべきことを命ずることができる」と規定している。同条文は、阪神・淡路大震災の以前から存在していた。しかし、阪神・淡路大震災の際に、同法の適用はなされなかった。

1999 年（平成 11 年）に水道法は改正され、厚生労働大臣が認めるときは知事に対して同項の事務を行うことを指示することができること、知事が同項に規定する事務を行うことができないと厚生労働大臣が認めるときは、大臣が代わりに当該事務を行うこと、の 2 項目が追加された。

阪神・淡路大震災の際には、制度としての枠組みは存在したが、現実的な状況想定が十

分でなく、かつ、制度に盛り込まれた精神を実現する計画も存在していなかったと考えられる。震災後に行われた水道法の改正によって、震災時に対応すべき意思決定者については柔軟になったといえるが、同法の内容を具体的にどのように具体化していくべきか明らかになっていない。水道事業は、市町村経営が原則とされており（水道法第6条第2項）、震災時に対する広域的な対策を複数の市町村が講じようとした場合、市町村間の提携という形でしか対応ができない。

(2) 広域的な水道整備について^{4)~7)}

本研究では、震災の特徴としてその被害が広域的に波及することを示し、その対策も広域的に講ずる必要のあることを第4章で指摘した。水道法では第5条の2において、水道の広域的な整備に関する基本計画（「広域的水道整備計画」という）が示されている。すなわち、地方公共団体は、必要と認めるときは広域的水道整備計画を定めるべきことを知事に要請できる。また、知事は必要と認めるとき議会の同意を得て同計画を定めることとされている。

水道法は1957年に公布されているが、広域的水道整備計画については、1977年に追加された。同計画の目的は、水道の普及を進める過程において生ずる様々な問題を解決することにあったと言える。すなわち、水道の未普及地区の解消を進め、経営基盤の強化を図りつつ安定した水源の確保を図り広域的な水の融通を行う⁸⁾、といった内容である。

このように従来の広域的水道整備計画は、水道の高普及を進める上での水供給の安定化を図る点が重視され、災害時の水供給という観点からの広域化の意義については議論されていない。今後、同計画の中で震災対策としての水道の広域的な整備を位置付けて考えることができよう。

(3) 下水処理水の利用について⁸⁾⁹⁾

下水道法では、下水処理水の再利用については言及されていない。このことは処理水の利用を認めていないという意味ではなく、利用方法までは下水道の管理分担の対象とはならないためと推察される。本研究で提案した水辺創成水路は、どのような位置付けになるか現在の制度では明確でない。ただし、水辺創成水路への送水を想定した場合、既存の下水処理場からの放流水の再利用に伴う吐口の配置の変更の手続きを下水道法第25条の3第4項に基づき行うことが必要である。

一方、この下水処理水を本研究で提案したように大都市域内で循環して利用し、下水処理場の位置から直接河川に放流することをしない場合、河川流量への影響が予想される。淀川の場合、渇水時には枚方地点において最大で河川流量の25%を下水処理水が占めることを清水ら¹⁰⁾は指摘している。下水処理水は、河川流量を維持する重要な構成要素となっている。

(4) 処理水放流量と河川流量について¹¹⁾¹²⁾

河川法第16条により河川整備基本方針と河川整備計画を策定することが義務付けられており、河川法施行令第10条には、河川整備基本方針において主要な地点における流水

の正常な機能を維持するために必要な流量（正常流量と称する）に関する事項を定めることが明記されている。正常流量とは、舟運、漁業、景観、塩害の防止、河口閉塞の防止、河川管理施設の保護、地下水位の維持、動植物の保護、流水の清潔の保持等を総合的に考慮し、渇水時において維持すべき流量（維持流量）及びそれが定められた地点より下流における流水の占用のために必要な流量（水利流量）の双方を満足する流量である。前述のとおり下水処理水を放流口位置から放流することを前提として河川の正常流量は定められている。処理水の放流量の変更等を伴う流域別下水道整備総合計画の策定に際しては下水道管理者と河川管理者が調整をすべきことが通達として示されているが、処理水の再利用に伴う放流先の堤内地側への変更に関する事項は定められていない。再利用量が大きい場合には、低水計画の見直しが必要となることもあろう。

以上に述べたように本研究で提案する内容は、水道法、下水道法、河川法に密接に関係している。しかし、各水法は、冒頭で定義する「水道」「下水道」「河川」という言葉により、大都市域水循環システムとしての連続的な視点を失いその一部分だけを切り取った枠内だけを管理する内容となっている。震災リスクの軽減という観点から考えても、このようにあくまで個別の管理だけを目指しているところに限界があると言える。すなわち、本研究で提案する、河川、水道、都市活動、下水道の各レイヤーから都市生活者の視点で水確保を図るという場合、その調整の部分に関係する制度は存在していない。第1章3節で述べた水循環の個別管理へのコンテキストの結果として存在する現制度の問題点はここにあると考える。

最後に、制度化はされていないが、現在、各分野からは水循環システムとしての思考を重視すべきであるとの提言がなされている^{13)~15)}。本研究は、長期を見通した構想計画としての位置付けと考えているが、その根拠法とも考えられる河川、水道、下水道の各法をまとめた水管理法といった制度が求められている。

8-5 結言

本章では、前章までの知見を踏まえ、それらを総合して大都市域水循環システムを再構成するために都市生活者の視座から統合の概念を提示した。また、同概念に基づき統合モデルを提案し、システム全体をどのように調整するかを明らかとした。そして、同モデルを対象地域に適用しモデルの有効性を検証した。さらに、本研究で提案した再構成のための代替案を現行の制度と照らし合わせ留意すべき事項を整理した。本章で提案した内容と得られた結論をまとめると以下のとおりである。

(1) 都市生活者の視座で大都市域水循環システムを統合する概念を提示した。すなわち、都市生活者が調整者となり、大都市域水循環システムを構成する4つのレイヤーの役割を調整し、水循環システム全体として「震災時における都市生活者の水確保と平常時の水辺創成」と「全体費用の最小化」を図るというものである。この統合概念は、都市生活者を

頂点とし、各レイヤーをサブシステムとするエシェロン構造と解釈できることを指摘した。

(2) 統合概念に基づき水道レイヤー・都市活動レイヤー・下水道レイヤーから構成される統合モデルを提示した。また、同モデルによる調整のアルゴリズムを提示した。この統合プロセスでは、水道レイヤーが水道事業体の全体提携を下水道レイヤーが処理水を利用した防災・減災用水の確保を、都市活動レイヤーがアメニティを考慮した処理水の都市への配分を行う。また、都市生活者（調整者）は全体システムの費用最小化を目指す。

(3) 統合モデルを対象地域に適用して、第 6 章と第 7 章で分析した水道と下水道の個別対策を都市生活者の視座から統合した。この結果、少なくとも 13 都市で期間 1 における消防用水と期間 2・期間 3 でのトイレ用水等を水辺創成水路の処理水で確保することが可能となった。このような水の循環利用を行うことにより、水道事業体だけが連絡管で水供給を行おうとした場合と比較し、大阪市と大阪府を結ぶ連絡管の口径を縮小することが可能となった。このことは、水量全体からみれば多くないが震災時の必要水量として下水処理水を有効に利用しうること及び平常時にも処理水がアメニティ向上のために有効に利用できることを端的に表している。各レイヤーの統合により大都市域の水循環が都市生活者の震災時の水確保と平常時のアメニティ向上に対してシステムとして機能していることを意味しており、意義のある結果である。

(4) 水道連絡管と水辺創成水路の両方を対策とすることにより、水循環システム構造安定性は、対象地域の全ての水道事業体で向上した。特に大阪府では、立地場所の優位性から内素なバスと冗長なバスの両方が大きく増加した。さらに、水辺創成水路の送水を受ける 13 都市では、両方のバスが共に増加した。複数の処理場から送水される都市や流域下水道の下水処理場からの送水を受ける都市でバスの増加が大きく安定性が特に高まった。

(5) 本研究で提案した大都市域水循環システムの再構成に関する計画を進めると仮定した時に制度面から留意すべき事項を明らかとした。この結果、河川法、水道法及び下水道法は、あくまで個別の管理だけを目指しているところに限界があり、本研究で提案する、河川、水道、都市活動、下水道の各レイヤーに対して都市生活者の視点で水確保を図るという場合、その調整の部分に相当する制度が存在していないことを問題点として指摘した。本研究は、構想計画として長期を見通した内容であるが、提案している計画内容を現行の制度に照らし合わせると、河川法、水道法、下水道法を併せ総合した水管理法といった制度が必要であることを提案した。

(6) 最後に、対象地域において水辺創成水路の建設を多くの処理場で進めた場合、特に京都府域の処理場の水を下流域で利用するとした時、淀川本川の流量に対して影響を及ぼすことが予想される。淀川（枚方地点）では、流水中に下水処理水が占める割合が平常時で 5%、渇水時では最大 25% と推定されている¹⁰⁾。流量が減少するだけでなく水質、生態系の維持に対しても影響を及ぼすと考えられる。下水処理水が淀川の維持流量の重要な構成要素になっていることに注意すべきである。

【参考文献】

- 1) 萩原良巳・清水康生：地震時を想定した大都市域水循環システムの再構成に関する考察，京都大学防災研究所年報 44 号，pp.63-78，2001.
- 2) M.D.Mesarovic,D.Macko,Y.Takahara：研野和人監訳・木村靖夫・中村達也・小島俊夫共訳，階層システム論，共立出版，1974..
- 3) 吉川和広：地域計画の手順と手法・システムズ・アナリシスによる，森北出版，1978.
- 4) 水道法制研究会監修：水道実務六法，ぎょうせい，2001.
- 5) 坂本弘道・萩原良巳・山村尊房：広域的水道整備計画手法に関する考察（Ⅰ），水道協会雑誌，No.585，pp.2-13，1983.
- 6) 坂本弘道・萩原良巳・山村尊房：広域的水道整備計画手法に関する考察（Ⅱ），水道協会雑誌，No.586，pp.2-11，1983.
- 7) 萩原良巳・今田俊彦：水道広域化の効果の評価に関する方法論的研究，衛生工学研究論文集，vol.21，pp.1-10，1985.
- 8) 国土交通省下水道部：下水道法令要覧，ぎょうせい，2001.
- 9) 下水道法令研究会編著：逐条解説下水道法，p24，ぎょうせい，2001.
- 10) 塩路勝久・清水康生：河川水中の下水処理水割合を指標としたカスケード型広域循環利用に関する考察～淀川流域を対象として～，下水道協会誌，Vol.34，No.409，pp.63-72，1997. No.409，1997.
- 11) 建設省河川局：河川六法，大成出版会，2000.
- 12) 建設省都市局下水道部監修：流域別下水道整備総合計画調査指針と解説，（社）日本下水道協会，1993.
- 13) 水道基本問題検討会：21 世紀における水道及び水道行政のあり方，1999.
- 14) 都市計画中央審議会答申：今後の下水道の整備と管理はいかにあるべきか，1995.
- 15) 河川審議会答申：新たな水循環・国土管理に向けた総合行政のあり方について，1999.

第9章 結 論

阪神・淡路大震災では、被災直後に水道が断水し、消火栓を使用することができなかった。他の消防水利も限られていたため、消火活動を十分に行うことができず、大規模火災を招いてしまった。また、避難所生活や被災した家では、生活のための飲料水やトイレ用水などの不足が大きな問題となった。このような時、都市生活者にとって、水源が水道であるか下水道、河川であるかは関心事でない。どれだけ必要な水を確保できるのかが問題である。

従来の大都市域水循環システムは、河川、水道、下水道という管理区分のもと各管理者が相互の調整を行うことがほとんどなく水の流れを分けて管理してきた。このことは、管理区分内の整備を効率的に推進するには有効であった。しかし、同システムは、阪神・淡路大震災のようにその管理の枠を大きく越える外力に対しては脆い構造であった。都市生活者自身も整備率の高さに惑わされ水は何時でも蛇口（消火栓）から出るものと錯覚していたかもしれない。

大都市域で都市生活者が利用する水は、河川から取水し水道、下水道そして河川（海）へと循環している。都市内を循環している水を柔軟に活用しようと考えたならば震災時の水確保はより可能であったのではないか。

本研究は、このような問題認識のもとで大都市域の水循環システムを再構成する方法論についてシステムズ・アナリシスの手順にもとづいて論じた。以下に各章の要約と今後の課題を述べる。

9-1 結果の要約

第2章では、淀川大都市域の水循環の概要を述べ、現状の問題点を明らかとし水循環システムの再構成の必要性を述べた。そして、従来は水管理者（行政）の立場から整備コンセプトを設定しがちである現状に対して、本研究では都市生活者の視座から水循環システムを再構成する次のコンセプトを提示した。③は目的①②を実現するための手段である。

①震災時における生活の維持と都市活動を可能とする

②平常時における大都市域の水辺創成を図る

③水確保のために大都市域水循環システムを一体的に考える

さらに、コンセプトに基づく方法論を議論する枠組みとして大都市域水循環システムモデルを提示した。同モデルは、大都市域水循環システムをネットワークとして明示的・一体的に記述するため、水管理の主体としての「河川」「水道」「下水道」と水を利用し都市活動や生活維持を行う「都市活動」の4つのレイヤーから構成される階層構造を有する。このネットワークは、水の循環経路を記述するだけでなく水輸送、水質変換及び貯留のいずれかの機能を有する多くの要素によって構成されている。同モデルは、空間的にも流域

レベル、都市レベル及び都市生活者レベルの3階層から構成される。本研究は、淀川大都市域の水循環システムの再構成を流域レベルで考察する研究であると位置付けた。

第3章では、震災ハザードの存在は考慮せずに淀川大都市域の平常時の水利用実態を把握し、震災リスクの影響ポテンシャルについて考察を行った。

まず、淀川大都市域の水道水がその水源の90%を淀川に依存し、特に京都市、京都府、大阪市、大阪府、神戸市の各水道事業体及び阪神水道企業団という6つの水道事業体が対象地域における水道システムの要であり主要な事業体であることを検証した。

また、水源である淀川は、水道取水だけでなく下水処理水の放流先にもなっており、取水と放流が繰り返されるカスケード型水利用が行われ、下流部では少なくとも4回の下水処理を行った処理水を含む水を水道水源として利用していることを指摘した。

次いで、用途別の水利用量を市区町村別の分布から考察した。家庭用水は主要都市とその周辺域で利用水量が多く、都市活動用水は大阪市中心部・北区、神戸市中心部など限られた都市部で利用密度が高い。この都市活動用水は昼間人口と相関が高く、震災時にはこれら都市生活者が影響を受けることを指摘した。

さらに、市区町村の震災に対する都市活動影響ポテンシャルを主成分分析の結果から考察した。総合軸として「第3次産業を中心とした都市活動の集積度」と「家庭・工場系の水利用の活性度」を定義し、両軸から都市活動影響ポテンシャルの高低を判断し、都市の分類を行った。

一方、淀川大都市域の中核都市部では、防火水槽の設置数が少なく公設消火栓への依存度が高いため、震災時に水道が断水した場合、火災により甚大な被害を受ける可能性があることを述べた。都市内の河川・池などが消防水利として重要であるが、対象地域では水面積が少ないだけでなく延焼の危険性の高い木造住宅密集地も多く存在している。都市生活者が集中している特性を活かして下水処理水を利用するなど水道システム以外の水利を確保することが重要であることを指摘した。

第4章では、活断層系による震災ハザード（震度7区域）が大都市域水循環システムに及ぼす影響を明らかにし、第3章の分析を踏まえて都市活動への影響について考察した。

まず、広域を対象とした地震動の推定方法について述べ、同方法によって対象地域とその近傍に存在する11の活断層系の震度を推定した。この結果より、対象地域の水循環ネットワークに影響を及ぼすと判断される花折断層系・西山断層系・有馬高槻断層系・生駒断層系・上町断層系・六甲断層系の6つの活断層系を選定した。

震災想定時に活断層系の震災ハザードに位置する施設は機能しないという仮定を設け、水循環ネットワークや都市活動への影響を考察した。この結果、主要な水道事業体を含む全15の浄水場と琵琶湖疏水、導水管路、送水管路が影響を受け、京都市、京都府、大阪市、大阪府、神戸市の下水処理場を含む全23の処理場とそれらにつながる主要下水管渠の多く及び淀川大堰などの河川構造物が大きな影響を受けることを明らかにした。さらに、この震災ハザードは、都市活動影響ポテンシャルの高い都市とも重なっており、都市生活

者の水利用の場合自体にも大きな影響を及ぼすことを示した。

このように震災ハザードは、単独の水道管理者、下水道管理者、河川管理者の管理区域を遥かに超え隣接する複数の管理区域にまで広がることを示した。このため水管理者は自らの管理区域内における対策だけを講じるのではなく、震災の影響を広域的に捉えた対策を考えておく必要があることを指摘した。また、対象地域内の水管理者は、何れかの活断層系による地震の影響を受けるため、これら震災は同時には起きないと仮定するならば、管理者は震災時の互助の認識を共有できるはずである。このことは管理者が広域的に協力することの動機になり得ることを指摘した。

第5章では、震災が大都市域水循環システムに及ぼす間接的な影響について分析した。すなわち、下水処理場や有害物質を扱う施設が被災し、有害物を河川に流出した場合には、水道水源である淀川で水環境汚染を起こし下流に位置する水道取水に影響を及ぼすこととなる。このような利水障害は、第3章で述べた直接的被害に対して間接的被害である。

まず、淀川における平常時の利水障害の事例や文献から水環境汚染の特徴を明らかにした。その結果、淀川では過去に多くの水質事故が発生しており、水源に影響を及ぼす水質事故が発生した場合、取水施設が集中する淀川下流部では淀川大堰の堰上げのために流速が遅く、汚染の影響が平時・低水時で2～3日間継続すること及び渇水時にはさらに長期化する可能性があることを指摘した。

また、水環境汚染の特徴は、汚染物質が多種多様であり流出経路が複雑であること、複数の汚染物質による累積的影響・長期間の蓄積的影響を受ける可能性があること、被害や影響の現れ方を時間的・空間的に特定することが困難であること、汚染に関して得られるデータが技術的要因・社会的要因によって限られることを述べた。そして、震災時には特に下水処理場、工場（小規模な事業場を含む）、一般・産業廃棄物処分場、し尿処理場といった発生源を想定する必要がある、これら発生源からの汚染物質は、支川や地下水を通じて淀川に流入する可能性のあることを指摘した。

水環境汚染の特徴として汚染物質に関するデータ収集の困難さを挙げるができるが、本研究では、限られたデータから水環境汚染のリスクマネジメントに関する有用な情報を引き出すために「汚染要因の構造化」→「取得可能データの選定」→「汚染評価指標の決定」という調査プロセスを提案した。すなわち、対象地域における汚染要因（汚染発生源、汚染経路、汚染物質名）の構造を知ることが重要であると考え、そのために取得可能データの様態を3レベル（定量、定性、存在の有無）で捉え、できるだけ情報を捨象することのないように構成した調査プロセスである。

同プロセスにより水環境汚染の汚染評価指標を選定し、同指標に係わる施設と震災ハザードをGISを用いて重ねて表示することにより、地域の汚染被害発生 of 潜在的危険性について考察した。この際の汚染物質は、有機物、栄養塩類、重金属、揮発性有機化合物、油類、伝染性病原菌、環境ホルモンを対象とすることとし、発生源から河川へ流出する物質の流出経路については地形図を利用する方法を提案した。さらに、震災時を想定し、各水

道取水の上流にはどれだけの有害物取り扱い施設が存在するかを汚染評価指標から明らかとし、水利権量と併せて取水への影響を診断した。その結果、大阪府の磯島取水口（ $20.9\text{m}^3/\text{s}$ ）、大阪市の柴島取水口（ $12.5\text{m}^3/\text{s}$ ）に対して影響の大きいことを指摘した。

さらに、震災想定時の水循環ネットワークへの直接的影響と本章で分析した水源汚染という間接的影響を併せて、河川レイヤー、水道レイヤー、都市活動レイヤー及び下水道レイヤーの相互には連鎖的な影響構造があることを指摘した。

第6章では、大都市域水循環システムの再構成のための水道システムにおける代替案について研究した。震災の特徴が広域性にあることから、代替案は水道事業体間を結ぶ連絡管と貯留施設を対象とした。

まず、阪神・淡路大震災による都市生活者の被害状況を整理し、それらを基に被災後の都市生活者の水需要と水道施設の復旧状況を時間の経過と震災被害区域の特性により9つの場面に分けて設定した。すなわち、被災後を、期間1（混乱期：3日間）、期間2（応急対策期：7日間）、期間3（その後の復旧期）に分け、被害区域を、直接被害区域（震災ハザード区域）、間接被害区域（上流での被災により水利用が不可能である区域）、給水影響区域（同じ給水区域内に直接被害区域を含むためその影響を受ける区域）に分けた。

次に、対象区域内の主要な水道事業体は、第5章までの分析により、互いに提携する動機を有しているため、全事業体が協力し合った全体提携を仮定し、水道連絡管の最適配置を線形計画問題として定式化した全体提携モデルを提示した。これは、水道事業体全体が協力することに総論として賛成した場合の代替案作成のためのモデルである。

しかし、各水道事業体は、震災時の不足水量を解消したいと考えると共に、連絡管の建設費用を最小化したいと考えるはずである。このような事業体の論理をゲーム理論による提携モデルとして定式化し、事業体の論理を優先した時に全体提携が成立するか否かの考察を行った。最初に、水量のみを考慮して提携の成立過程を分析した。その際、提携の条件を2ケース想定した。すなわち、事業体同士が互いに望むことにより提携が成立する場合と何れかの事業体が提携を望めば提携が成立するとした場合である。前者の場合には、全体提携は成立せず、後者の場合には全体提携が成立することを確かめた。ただし、費用負担までを考慮した場合、個別事業体が費用最小化を優先すれば全体提携よりも部分提携が成立することを指摘した。

このとき、期間1の直接被害区域では、連絡管の利用が困難であるため貯留施設の整備に頼らざるを得ない。また、水道管路が機能しないため消火栓が利用できず他水源を用意する必要のあることを指摘した。

第7章では、大都市域水循環システムを再構成するための下水道システムにおける代替案について研究した。そのコンセプトは、第2章で設定した3つである。

まず、震災対策として、大都市域において消防用水とトイレ用水等の確保のために有効となり、かつ平常時には都市生活者のアメニティ向上に寄与する下水処理水を利用した水辺創成水路を提案した。

次いで、水確保の安定性の定義を行い、水辺創成水路を設けることにより、震災時にお

ける都市生活者の水確保の安定性が増すことを明らかとするための評価指標を提案した。すなわち、分割された水循環システムをグラフ理論の概念を適用して水循環ネットワークとして一体的に記述し、その構造安定性を評価するために 13 の評価指標を提示した。

さらに、大都市域水循環システムにおけるレイヤー間・レイヤー内の水循環をマトリクス演算により記述する方法を提案した。そして、同方法に基づいて下水処理水を都市に配分するための水量を決定するために、震災時の消防用水、トイレ用水等の確保と平常時のアメニティ向上の両方を目的関数とした水辺創成モデルを提案した。同モデルでは、配分水量を求めるために非線形式を解かなければならないため、震災時と平常時の 2 段階に分けてモデル式を線形化して順次解くという方法を提示した。

最後に、複数の活断層系が重なり合いかつ人口の集積度が高く下水処理場が複数存在する淀川右岸区域に対して、その及ぼす影響が大きくかつ処理水を有効に利用できる生駒断層系の震災を対象として事例分析を行った。この結果、下水処理場の処理水を自然流下でどこの都市にどれだけ配分することが有効であるかを具体的に指摘すると共に、水辺創成水路の建設による水循環ネットワークの構造安定性について評価を行い、水辺創成モデルと評価指標の有効性を検証した。

分析の結果、淀川右岸の 7 市 1 町全ての市町村で下水処理水を必要としているにも関わらず、3 市以外に処理水を送ることができない結果となった。この理由は、下水処理場が地盤高の低い河川流末に集中している事が原因である。下水とその処理水を効率よく排除するという、これまでの下水道整備の考え方に基づいた施設配置は、処理水を河川に放流するだけではなく都市域で利用するという観点からみた場合に、適切な配置ではないことを事例分析から明らかとした。

第 8 章では、前章までの分析を踏まえ、大都市域水循環システムを再構成する概念とその方法論を述べた。

まず、都市生活者の視座から大都市域水循環システムを再構成するための統合概念を提示した。すなわち、都市生活者が調整者となり、システムを構成する 4 つのレイヤーの役割を調整し、水循環システム全体として「震災時における都市生活者の水確保と平常時の水辺創成（サブシステム）」および「費用の最小化（全体システム）」を図ると考えた。この統合概念は、都市生活者を頂点とし、各レイヤーをサブシステムとするエシェロン構造と解釈できることを指摘した。

この統合概念に基づき、水道レイヤー・都市活動レイヤー・下水道レイヤーから構成され階層構造を有する統合モデルを提示した。また、同モデルにより、水道レイヤーが水道事業体の全体提携を下水道レイヤーが防災・減災用水の確保を図り、都市活動レイヤーが都市生活者のアメニティを考慮した処理水の都市への配分を行い、全体システムとして費用最小化を目指すという統合プロセスを提示した。ただし、費用の最小化に関しては対象とする計画のレベルにより注意する必要がある点を指摘した。すなわち、長期的な構想計画や基本計画のレベルである場合、全体コストは強い制約とはせず、コストの議論は、計

画が整備計画・事業化計画・事業実施計画と具体化されるに伴ってその重要性を増す点である。

以上の統合モデルを対象地域に適用して、第6章と第7章で分析した水道と下水道の個別代替案を都市生活者の視座から統合した。分析は、水道連絡管と処理水のトイレ用水などへの利用が有効となる期間2・期間3を対象とした。期間1で重要となる消防用水については都市内貯留施設を水辺創成水路の各所に設けて対応するものと仮定した。

この結果、少なくとも13都市で期間1における消防用水と期間2・期間3でのトイレ用水を水辺創成水路の処理水で確保することが可能となった。さらに、このような水の循環利用を行うことにより、水道事業体だけで連絡管による水供給を行うとした場合と比較し、大阪市と大阪府を結ぶ連絡管の口径を縮小することが可能となることを示した。このことは、震災時の必要水量として下水処理水を有効に利用しうること及び平常時にも処理水がアメニティ向上のために有効に利用できることを表し、各レイヤーの統合により大都市域の水循環が都市生活者の震災時の水確保と平常時のアメニティ向上に対してシステムとして機能していることを意味している。この結果は意義があり強調したい。

また、水道連絡管と水辺創成水路の両方を計画することにより、ネットワーク構造安定性は、対象地域の全ての都市生活者にとって向上することを検証した。特に大阪府では、立地場所の優位性から内素なパスと冗長なパスの両方が大きく増加し、さらに、水辺創成水路の送水を受けることが可能な都市では、両方のパスが共に増加し水確保の安定性が高まることを示した。

最後に、本研究で提案した大都市域水循環システムの再構成に関する計画(水道連絡管、水辺創成水路による下水処理水の利用)を進めると仮定した場合に制度面から留意すべき事項を明らかとした。すなわち、第1章で提示した水管理者の個別管理へのコンテキストの結果として存在する現行の河川法、水道法、下水道法は、あくまで個別の管理だけを目指しているところに限界があり、本研究で提案する、河川、水道、都市活動、下水道の各レイヤーを都市生活者の視座で調整し水確保を図ることを目指した場合、その調整の部分に相当する制度が欠落していることを問題点として指摘した。本研究は、構想計画として長期を見通した内容であるが、提案している代替案を現行の制度に照らし合わせると、河川法、水道法、下水道法を併せて総合した水管理法といった制度が必要であることを指摘した。

9-2 今後の課題

以上が本研究の成果であるが、残された課題は多い。本研究では、大都市域の水循環システムの再構成をテーマとして論じたが、その動機は現在の水管理が河川、水道、下水道というように個別に管理がなされており、この個別の整備率自体は高水準であるが、そのことが必ずしも震災リスクの軽減につながっていないことである。第1章では、この点を

阪神・淡路大震災の事例を引用して説明し、個別管理についてもそこに至るコンテキストについて概略の説明をした。しかし、このコンテキストについてはより歴史を遡ると共に技術的・制度的な側面だけでなく生活様式の変化を含めてその経緯を学び、その上で今後、都市生活者が目指す水循環システムの姿(生活の姿)をイメージする必要があると考える。この点は第2章で述べた再構成のコンセプトの設定に密接に関連する内容である。

また、本研究では、個別管理の弊害を指摘しているが、個別管理によって効率的に整備を進める時期があればこそ大都市域における現在の高水準の社会基盤整備が実現し都市生活者の生活維持が可能となっている。この点を忘れることなく本研究が構想計画として水循環システムの「再構成」(それぞれの役割を果たしている各部分をまとまりのある形に組み立てなおすこと:新明解国語辞典より)を研究したものであることを明記しておきたい。

本研究では多くの前提条件をおき論理を構成しモデル化を行った。これらに関連する課題を以下に述べる。

まず、農業用水、工業用水、地下水は考慮しないとした。しかし、農業用水や地下水に関しては、データが存在しかつ制度によって裏付けされるなど、現実的に震災時の水供給が可能であるならば、水循環システムモデルを構成する要素としてモデルに含める必要がある。工業用水に関しても水質変換までを代替案として含めて考えるならば、水循環システムの構成要素として扱うことが考えられる。これらをモデルに内在させる場合には本研究で4つのレイヤー構造としているのを、例えば農業用水、地下水、工業用水を設け、そこからの水供給が都市活動だけでなく農村部も含めた地域活動に寄与するとしたモデル構造に拡張するモデルを考えることが可能である(図9-1参照)。

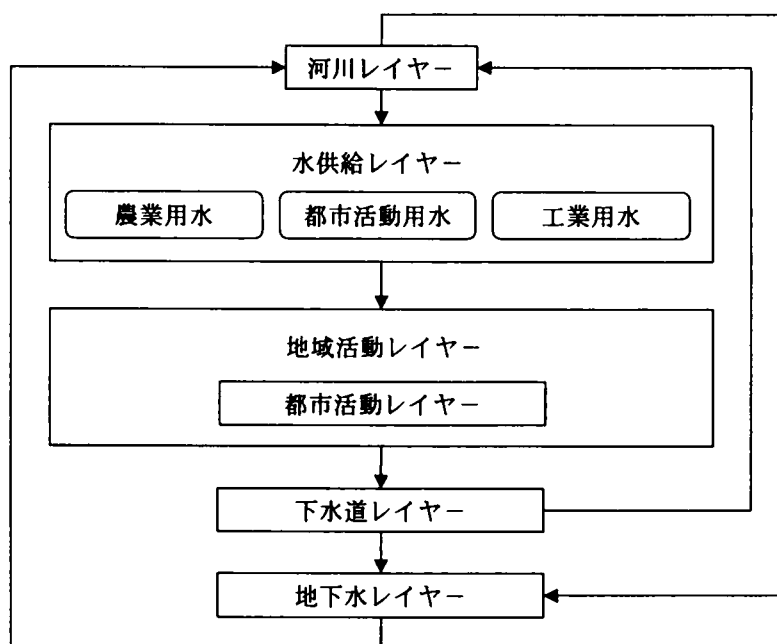


図9-1 大都市域水循環システムモデルを拡張した概念

本研究では、水の価値について議論をしていない。水道事業体間の提携モデルでは、各事業体が供給する水の価値を等しいと仮定して、連絡管の建設費用の議論を行っている。しかし、現実には対象地域内の水道事業体間において供給原価の差が生じている。例えば、このような金銭価値で評価した水の価値を考慮して提携の可能性を分析することが考えられる。さらに、この水の価値の問題は、第7章で提案した水辺創成モデルにおける震災時の用水確保と平常時のアメニティ向上という2つの側面をどのように評価するかという問題にも関連する。本研究では、非線形計画モデルを簡便に解くために、まず震災時の用水を確保するという点を重視し、この震災時の防災・減災用水を確保するための線形計画モデルを解き、次いで平常時のアメニティ向上を高めるための線形計画モデルを解くという2段階の循環的解法を提案した。この方法は、まず減災価値、次いで環境価値である平常時の都市域のアメニティ向上という順番で2段階に分けた評価方法である。大都市域を循環する水は輸送・水質変換・貯留によってその状態を記述できるが、水の価値をその場に依拠してどのように評価するかは重要である。このような水の価値を考慮した水循環システムの再構成は今後の重要な研究課題である。

第7章では、下水処理水を利用した水辺創成モデルを提案した。同モデルは、大都市域水循環システムの水の流れをマトリクス演算によって記述している。水の流れをノード対ノードの対応関係として記述しているが、ノード間の水輸送またはノードが表す施設自身への外力の影響の大きさを被害率として与え、これらを被害マトリクスとして表し、マトリクス演算に組み込むことが可能である。この方法は、水循環ネットワークの信頼性の分析に応用が可能であり、今後の課題である。さらに、他のリスクに対するマネジメントのために水循環の一般的な記述方法として応用することが可能である。例えば、水源から水利用までの水供給プロセスに影響要因を介して記述することにより渇水リスクの分析に適用することができる。

本研究では、河川レイヤーに係わる代替案を提示することができなかった。この理由は、農業用水や工業用水という利水者をモデルに内在化できなかったことが大きな理由である。震災対策としては、維持流量を確保しつつ用水間で水利権を一時的に譲渡することや取水施設の相互利用などが考えられる。これらを含めた計画については今後の課題としたい。

最後に、第8章では統合概念と統合モデルを提案したが、課題が多い。エシェロン構造として記述された統合概念については、調整者である都市生活者が全体システムをどのような観点から評価するかが重要である。前述の減災価値や環境価値の評価と関連している。その議論を踏まえた統合概念の記述が求められる。本研究では、統合モデルにおいて、費用最小を目指して都市生活者がサブシステム間の調整を行うものとした。しかし、必要となる費用の多寡だけで水辺創成水路や連絡管の可否を決定することは構想計画として適切ではない。この点は本研究の限界であると考え、今後、構想計画レベルでの研究であることを考慮し、評価方法について研究することが必要である。

また、淀川大都市域に対する事例分析では、水辺創成経路の利用できる区域に関して府

県境界（大阪市は単独として扱った）と大河川を越えないという条件を付した。この条件を除いたならば、京都府に立地している下水処理場の処理水を下流域で広く利用し有効に活用できる可能性がある。この点については水辺創成水路の有効性を検証する意味で重要であり課題としたい。

本研究は流域レベルから大都市域の水循環システムの再構成を試みているが、その結果得られた情報を境界条件（または制約条件）として与え、都市レベルや都市生活者レベルでの再構成の研究を行うことが考えられる。この場合、各レイヤーで想定する水循環システムモデルの構成要素が異なってくる。例えば、送水管から各戸（水利用者）までの水道管路の被災状況を考慮すると考えるならば、本研究では管路情報を送水管（一部配水管）まで扱うとしたが、さらに配水管・給水管レベルの管路までを対象として市町村のレベルでのモデル化が必要である。また、下水道レイヤーでも下水管渠の被災に伴う地下水汚染を対象とするならば、空間スケールを市町村のレベルとし下水管渠は枝管までの被災を対象として分析し、時間軸は汚染の拡大を記述できる単位を考えなければならない。河川レイヤーにおいても、汚染物質が流入する経路となる支川までを分析の対象とする必要がある。また、震度推定の方法論も本研究で行った流域レベルを対象とした最大震度を広域的に求める方法でなく、施設の配置までを評価できるレベルの解析が必要となる。同時に震災による水循環システムへの影響内容も本研究で仮定した施設が機能するか否かという2分法でなく推定震度に対する被災率という概念が必要となる。このように震災被害として何を対象とするか、その時間的・空間的なスケールに合わせて各レイヤーにおける構成要素のスケールを決定し水循環システムモデルを構成することが重要である。

また、同じ流域レベルのモデルであっても次のような理由から水循環システムモデルのシステム境界をさらに拡張することが考えられる。

- ①都市生活者の水確保をより確実なものとするために多数の水源を考えておく必要がある
- ②様々なリスクに関わる水循環経路をモデルに内在化しておく必要がある
- ③都市生活者だけでなく地域の生活者に対する水確保をも考えていく必要がある

本研究では、淀川大都市域を対象としているが琵琶湖流域も震災の危険性がある。琵琶湖は本研究で対象とした宇治川、京都市水道の水源となっており、被災を想定した場合の影響は甚大である。琵琶湖流域までを含めた空間スケールで水確保を考えた場合には、淀川水系だけの水確保は困難である可能性が高く、例えば紀の川流域まで対象地域を拡大することが必要であろう。

震災リスクだけでなく環境汚染リスク、渇水リスク、健康リスクを対象とする場合には、水確保を確実にすると共に多様な水循環経路をモデルに内在化させることが必要である。図9-1に示すよう、大都市域では工業用水、さらに農村部を含めた地域活動レイヤーとして農業用水や地下水を内在化した水循環システムモデルへと拡張することが考えられる。このように空間スケールを拡張し都市域だけでなく地域としての水確保を考えて研究を進める必要があると考える。

大都市域の水循環システムを構成する河川、水道、下水道に関する研究は、行政の区分と同様に別々になされているのが現状である。今後、本研究で対象とした震災リスクだけでなく環境汚染リスク、渇水リスク、浸水リスク、生態リスク、健康リスクをも考慮した大都市域水循環システムの再構成に関する研究が必要である。本研究は、前述のように多くの課題を有するが、このための第一歩として再構成のための方法論の道筋を示し得たと考える。

謝 辞

本論文を結ぶにあたり、本研究の遂行に際して御指導・御協力を戴いた方々に感謝の意を表したい。

まず、京都大学萩原良巳教授には、本研究を遂行する貴重な機会を設けて戴くとともに、研究の遂行においては多くの研究活動をとおして熱意あふれる御指導とご鞭撻、そして、深い御配慮を賜った。ここに深甚なる感謝の意を表します。

京都大学岡田憲夫教授には本論文の作成にあたり、御指導と御配慮を賜るとともに日々の研究活動に対して多大な激励を戴いた。ここに深く感謝いたします。また、京都大学小尻利治教授には、本論文の作成にあたり懇切な御指摘と御指導を戴いた。ここに深謝いたします。また、京都大学鈴木祥之教授には、ご指導とともに研究遂行の励ましを戴いた。ここに深謝いたします。

京都大学池淵周一教授には、大所高所からの御指導と御配慮を戴くとともに論文執筆への激励を戴いた。ここに深謝いたします。

京都大学非常勤講師渡辺晴彦博士には研究の遂行にあたり貴重な御意見を戴くとともに暖かい励ましを戴いた。ここに深謝いたします。本研究を行うにあたっては、京都大学防災研究所総合防災研究部門の自然・社会環境防災分野（萩原研究室）で共に研究した学生の皆さんから多くの助力を得ました。特に秋山智広君、阪本浩一君、中瀬有祐君、西村和司君からは御助力を戴きました。ここに感謝いたします。

また、流通科学大学酒井彰教授からは、環境汚染に関しての御指導と激励を戴き、大阪ガス小川安雄博士からは震度推定に関して御指導を戴きました。ここに感謝いたします。

京都市弘元晋一氏、大阪府堀真佐司氏、神戸市松下眞氏、日水コン森正幸氏からは、水循環に関して御意見を戴くとともに貴重な基礎資料の御提供を戴いた。ここに感謝いたします。

さらに、研究を通じて日水コン高橋邦夫博士、清水丞博士からは都市の水辺利用に関するご示唆を戴くとともに研究遂行の励ましを戴いた。また、劉樹坤中国水利水電科学研究院教授（前京都大学客員教授）には研究遂行の励ましを戴いた。ここに感謝いたします。

このような水循環システムに関する研究が遂行できたのは、日水コン堤武顧問（前会長）、平野栄一社長、林秀樹環境事業部長、同事業部今田俊彦部長をはじめとする多くの方々の御理解があつてこそであり、ここに感謝いたします。

著者の鳥取大学における恩師である鳥取大学野田英明名誉教授には、長年にわたり暖かな御配慮を賜った。ここに心より感謝の意を表します。

最後に京都大学防災研究所での研究生活を支えてくれた妻八重子と子供達に感謝します。